

**PENGARUH LAJU PENDINGINAN TERHADAP KEKERASAN DAN
STRUKTUR MIKRO *PULLEY* ALUMINIUM DENGAN *PERMANENT
MOLD CASTING***

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MATERIAL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**SITI AMALINA AZAHRA
NIM. 145060201111010**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, Rabb Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, atas rahmat serta karunia-Nya yang tiada henti sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Pengaruh Laju Pendinginan Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Pulley Aluminium dengan *Permanent Mold Casting*”**

Skripsi ini merupakan laporan akhir yang harus dipenuhi dalam mata kuliah Tugas Akhir pada Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Skripsi ini tidak dapat diselesaikan dengan baik tanpa bantuan, bimbingan, serta motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Keluarga tercinta; Ayahanda Muhamad Nurdin, Ibunda tersayang Liana Prawita Sutaryo, Kakak Siti Amalia Khairunnisa. Terima kasih atas kasih sayang tanpa batas, atas seluruh usaha dan pengorbanan, atas seluruh doa yang tak henti – hentinya dipanjatkan untuk penulis selama awal perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini.
2. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng., Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT, Met, selaku dosen pembimbing 1 yang telah banyak memberikan pengarahan dan motivasi selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan skripsi.
5. Bapak Khairul Anam, ST., MSc, selaku dosen pembimbing 2 yang telah banyak memberikan pengarahan dan motivasi selama pelaksanaan skripsi.
6. Bapak Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng, selaku dosen pembimbing akademik yang telah banyak memberikan masukan dalam perkuliahan dan selama penyusunan skripsi.
7. Seluruh dosen dan karyawan jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
8. Kepada Nenek Sutini, Tante Linda dan Keluarga Bogor, Mas Ajie dan Jagoan kesayangan Umar Dwi Baroto, terimakasih atas motivasi dan dukungannya kepada penulis.

9. Teman seperjuangan konsentrasi material Putri dan Luqman, dan teman seperjuangan penelitian Adinda dan Maskur, terimakasih untuk kerjasama, perjuangan dan kebersamaanya selama ini.
10. Keluarga Besar Laboratorium Pengujian Bahan Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya atas dukungan dan pengalamannya selama perkuliahan di jurusan ini.
11. Teman Divisi Aerokreasi 2014 Universitas Brawijaya; Alif, Gheny, Bos Arda, Fadlur, Bang Tops, Amir, Restu, Danu, Ikmal. Terimakasih untuk kebersamaan, ilmu, perjuangan, dan pengalamannya selama ini.
12. Basis kontrakan Sendi dan Zalbie; Muhamad Farhan Diesa, Raka, Komeng, Ray, Adam, Fraghian, Jipau, Padang, Mea, Putri, Usman. Bagaimanapun, terima kasih telah membuat hidup di Malang menjadi lebih berwarna. Sampai jumpa di masa depan.
13. Lava Girls 2014. Terima kasih untuk tetap memberi keyakinan bahwa putri mesin tetap bisa menjadi seorang perempuan dengan bergelar sarjana teknik mesin.
14. Keluarga Besar Teknik Mesin 2014, MAF14 LAVA. Terima kasih untuk kebersamaannya dan makrab tiap semesternya. Sukses selalu untuk kalian.
15. Teman jarak jauh, Eliza Adira, Raifa Izdihar, Paramita Nindya, Pocut Yasmine, Luthfiyyah Tamima, Hanna Farah. Terima kasih atas kesabarannya mendengarkan cerita panjang lebar, dan telah menginspirasi akan kehidupan. Sukses selalu, kawan.
16. Dan semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu, yang telah banyak membantu dan memberikan arahan selama penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini tidak lepas dari kekurangan. Oleh karena itu penulis sangat menghargai setiap saran dan masukan untuk kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan rekan-rekan yang lain.

Malang, April 2018

Penulis



DAFTAR ISI

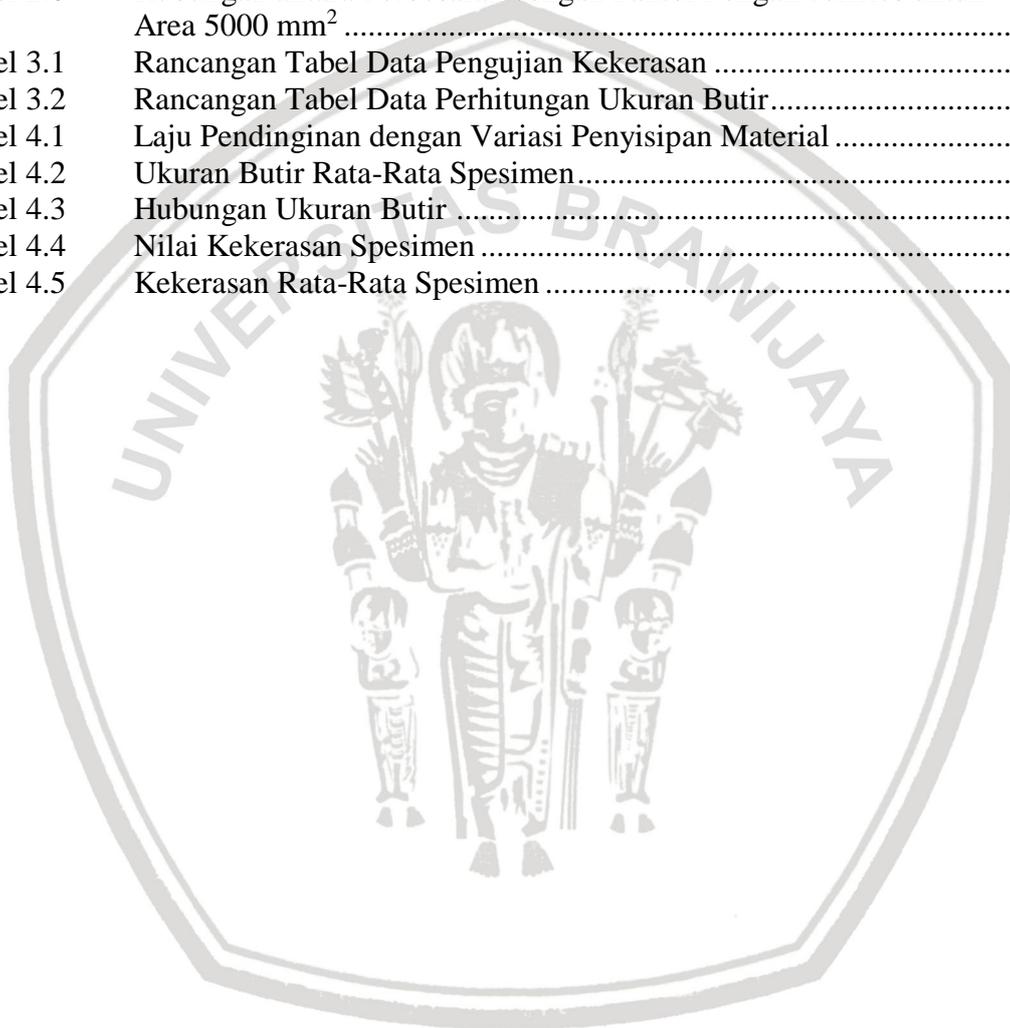
	Halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vi
RINGKASAN	vii
SUMMARY	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	5
2.2 Aluminium.....	6
2.2.1 Karakteristik Aluminium.....	6
2.2.2 Proses Pembuatan Aluminium.....	8
2.2.3 Aluminium dan Paduannya.....	8
2.3 Diagram Fasa.....	10
2.3.1 Pengertian dan Klasifikasi Diagram Fasa.....	10
2.3.2 Diagram <i>Binary Al-Zn</i>	11
2.4 Proses Produksi Logam.....	12
2.4.1 Definisi Pengecoran Logam.....	12
2.4.2 <i>Permanent Mold Casting</i>	13
2.4.3 Peleburan.....	14
2.4.4 Solidifikasi.....	15
2.4.4.1 Konduktivitas Termal.....	15
2.4.4.2 Laju Solidifikasi.....	16
2.4.4.3 Mekanisme Solidifikasi.....	17
2.4.4.4 <i>Short Freezing Range Cooling</i>	18
2.4.4.5 <i>Long Freezing Range Cooling</i>	19
2.5 Sifat Mekanik Logam.....	20
2.5.1 Pengertian dan Klasifikasi Sifat Mekanik.....	20
2.5.2 Pengujian Sifat Mekanik Logam.....	21
2.5.2.1 Pengujian Kekerasan.....	21
2.5.2.2 Pengujian Metalografi.....	25
2.5.3 Perhitungan Ukuran Butir.....	27
2.5.3.1 Planimetri.....	27
2.6 Hipotesis.....	29



BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1 Metode Penelitian.....	31
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	31
3.3 Variabel Penelitian	31
3.3.1 Variabel Bebas.....	31
3.3.2 Variabel Terikat.....	31
3.3.3 Variabel Terkontrol	32
3.4 Alat dan Bahan	32
3.4.1 Alat	32
3.4.2 Bahan.....	37
3.5 Prosedur Penelitian.....	38
3.5.1 Pengecoran <i>Pulley</i> Aluminium.....	38
3.5.2 Prosedur Pengambilan Data Nilai Kekerasan.....	39
3.5.3 Prosedur Pengambilan Data Pengujian Mikrostruktur	39
3.6 Skema Penelitian	40
3.7 Desain Benda Kerja.....	40
3.8 Rancangan Tabel dan Grafik Penelitian.....	41
3.8.1 Rancangan Tabel Penelitian	41
3.8.2 Rancangan Grafik Penelitian.....	42
3.9 Diagram Alir Penelitian	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	45
4.1 Data Hasil Pengujian.....	45
4.1.1 Laju Pendinginan.....	45
4.1.2 Hasil Pengujian Mikrostruktur	46
4.1.3 Hasil Pengujian Kekerasan.....	48
4.2 Grafik dan Pembahasan.....	50
4.2.1 Laju Pendinginan.....	50
4.2.2 Pengaruh Laju Pendinginan terhadap Ukuran Butir.....	51
4.2.3 Pengaruh Laju Pendinginan terhadap Kekerasan	51
BAB V PENUTUP	53
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Sifat Fisik Aluminium Murni.....	7
Tabel 2.2	Sifat Mekanik Aluminium	7
Tabel 2.3	Sistem Penamaan Paduan Aluminium	9
Tabel 2.4	Titik Lebur Logam	14
Tabel 2.5	Konduktivitas Termal Material pada Temperatur Ruang	15
Tabel 2.6	Klasifikasi Pengujian Rockwell	24
Tabel 2.7	Jenis Cairan Etsa untuk Pengujian Metalografi	27
Tabel 2.8	Hubungan antara Perbesaran dengan Faktor Pengali Jeffries untuk Area 5000 mm ²	28
Tabel 3.1	Rancangan Tabel Data Pengujian Kekerasan	41
Tabel 3.2	Rancangan Tabel Data Perhitungan Ukuran Butir	41
Tabel 4.1	Laju Pendinginan dengan Variasi Penyisipan Material	45
Tabel 4.2	Ukuran Butir Rata-Rata Spesimen	46
Tabel 4.3	Hubungan Ukuran Butir	48
Tabel 4.4	Nilai Kekerasan Spesimen	49
Tabel 4.5	Kekerasan Rata-Rata Spesimen	49



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Diagram fasa biner Al-Zn	10
Gambar 2.2	Diagram fasa biner selama pendinginan	11
Gambar 2.3	Diagram fasa <i>binary</i> Al-Zn	12
Gambar 2.4	Tahapan dasar pengecoran <i>permanent mold casting</i>	13
Gambar 2.5	Perpindahan panas konduksi	16
Gambar 2.6	Diagram proses laju pendinginan	17
Gambar 2.7	Bentuk butir <i>columnar</i> dan <i>equiaxed</i>	18
Gambar 2.8	Skema <i>short freezing range cooling</i>	19
Gambar 2.9	Struktur mikro <i>short freezing range cooling</i>	19
Gambar 2.10	Skema <i>long freezing range cooling</i>	20
Gambar 2.11	Struktur mikro <i>long freezing range cooling</i>	20
Gambar 2.12	Indentor pengujian Vickers	22
Gambar 2.13	Spesimen uji yang telah di <i>mounting</i>	25
Gambar 2.14	Skema ilustrasi terlihatnya struktur mikro pada batas butir	26
Gambar 2.15	Contoh butiran	28
Gambar 3.1	Tungku peleburan	32
Gambar 3.2	Cetakan permanen	33
Gambar 3.3	<i>Burner</i>	33
Gambar 3.4	Sarung tangan	33
Gambar 3.5	<i>Thermo gun</i>	34
Gambar 3.6	Kamera	34
Gambar 3.7	Amplas	35
Gambar 3.8	Kain flanel	35
Gambar 3.9	<i>Thermocouple</i>	35
Gambar 3.10	Rockwell <i>digital hardness tester</i>	36
Gambar 3.11	Mikroskop logam	37
Gambar 3.12	Aluminium Al-Zn	37
Gambar 3.13	<i>Metal polish</i>	38
Gambar 3.14	Etsa	38
Gambar 3.15	Skema penelitian	40
Gambar 3.16	Grafik hubungan material sisipan pada bagian alas terhadap laju pendinginan	42
Gambar 3.17	Grafik hubungan laju pendinginan terhadap ukuran butir	42
Gambar 3.18	Grafik hubungan laju pendinginan terhadap kekerasan	42
Gambar 3.19	Diagram alir penelitian	43
Gambar 4.1	Foto mikrostruktur perbesaran 100x laju pendinginan variasi penyisipan (a) baja 0,963°C/s, (b) tembaga 1,169 °C/s (c) pasir 0,673°C/s	46
Gambar 4.2	Perhitungan jumlah butir	47
Gambar 4.3	Daerah pengujian kekerasan	49
Gambar 4.4	Grafik variasi penyisipan material pada bagian alas terhadap laju pendinginan	50
Gambar 4.5	Grafik pengaruh laju pendinginan terhadap ukuran butir	51
Gambar 4.6	Grafik laju pendinginan terhadap nilai kekerasan spesimen	51

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1.	Dimensi Benda Kerja
Lampiran 2.	Dimensi Cetakan Coran
Lampiran 3.	Tutup Cetakan Coran
Lampiran 4.	Alas Cetakan Coran
Lampiran 5.	Hasil Uji Komposisi Spectro Lab
Lampiran 6.	Hasil Penghitungan Butir Manual
Lampiran 7.	Hasil Pengujian Kekerasan Rockwell



RINGKASAN

Siti Amalina Azahra, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juni 2018, *Pengaruh Laju Pendinginan terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Pulley Aluminium dengan Permanent Mold Casting*

Dosen Pembimbing: Wahyono Suprpto dan Khairul Anam.

Aluminium merupakan logam ringan dengan nilai *strength-to-weight ratio* yang mampu bersaing dengan baja. Aluminium banyak digunakan pada industri manufaktur khususnya di bidang otomotif. Aluminium memiliki sifat mampu cor dan sifat mekanik yang kurang baik, oleh karena itu, pada penggunaannya aluminium umum dipadukan dengan unsur lain untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Pada penelitian ini menggunakan aluminium paduan Al-Zn yaitu salah satu paduan aluminium yang umum digunakan pada komponen dasar pesawat terbang (*airframe*) ataupun komponen otomotif. Paduan Al-Zn menunjukkan sifat ketahanan korosi yang baik.

Dalam pengecoran logam, laju pendinginan merupakan salah satu aspek yang mempengaruhi kualitas hasil cor. Hal ini dikarenakan pada proses pengecoran terdapat proses pendinginan yang akan mempengaruhi ukuran, bentuk, serta keseragaman butir yang mana akan mempengaruhi sifat mekanik material secara langsung. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui dampak laju pendinginan terhadap nilai kekerasan dan struktur mikro pulley aluminium.

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental dengan variasi laju pendinginan, dengan cara menyisipkan material yang memiliki konduktivitas termal berbeda pada cetakan permanen baja di bagian alas. Hasil penelitian ini mendapatkan nilai kekerasan dan struktur mikro yaitu ukuran diameter butir rata-rata yang dihitung dengan metode Planimetri. Dari hasil penelitian didapatkan dengan meningkatnya laju pendinginan (1,169 °C/s penyisipan tembaga), maka diameter butir rata-rata menurun (72,35µm). Jika dibandingkan dengan pendinginan sedang (0,963 °C/s penyisipan baja ukuran butir 86,72µm) dan rendah (0,673 °C/s penyisipan pasir ukuran butir 89,24µm). Adapun nilai kekerasan yang dihasilkan meningkat yaitu laju pendinginan penyisipan pasir 27,24 HRb, penyisipan baja 47,07 HRb, dan penyisipan tembaga 50,73 HRb.

Kata Kunci : Pengecoran Logam, Cetakan Permanen, Laju Pendinginan, Konduktivitas Termal, Kekerasan, Rockwell, Metalografi, Planimetri.

SUMMARY

Siti Amalina Azahra, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, June 2018, *Effect of Solidification Rate on Hardness and Microstructure of Pulley Aluminium with Permanent Mold Casting*.
Academic Supervisor: Wahyono Suprpto dan Khairul Anam.

Aluminum is a lightweight metal with a strength-to-weight ratio that is to be considered to steel. Aluminum is widely used in manufacturing industry, especially in the automotive field. Aluminum has unsatisfying casting properties and poor mechanical properties, therefore, in its use aluminum is commonly combined with other elements to improve its mechanical properties. In this study using Al-Zn aluminum alloy is one of aluminum alloy commonly used in airframe or automotive component. Al-Zn alloys show good corrosion resistance properties.

In metal casting, the cooling rate is one aspect that affects the quality of cast results. This in behalf of within casting process there is a cooling process that will affect the size, shape, and uniformity of the grain which will affect the mechanical properties of the material directly. The purpose of this research is to know the effect of cooling rate on hardness value and aluminum pulley micro structure.

This research was conducted by experimental method with variation of cooling rate, by inserting material having different thermal conductivity on permanent steel mold on the base. The results of this study get the value of hardness and micro structure is the average diameter grain size calculated by Planimetri method. From the research results obtained by increasing the cooling rate (1,169 °C / s copper insertion), the average grain diameter decreased (72,35µm). When compared with moderate cooling (0.963 °C / s steel inserts grain size 86.72µm) and low (0.673 °C / s sand insertion of grain size 89.24µm). The resulting hardness value increased the cooling rate of sand insertion 27.24 HRb, insertion steel 47.07 HRb, and copper insertion 50.73 HRb.

Keyword : Metal Casting, Permanent Mold Casting, Cooling Rate, Thermal Conductivity, Hardness, Rockwell, Metallography, Planimetric.

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, 5 Juni 2018
Mahasiswa,



Siti Amalina Azhra
NIM. 145060201111010

LEMBAR PENGESAHAN
PENGARUH LAJU PENDINGINAN TERHADAP KEKERASAN DAN
STRUKTUR MIKRO PULLEY ALUMINIUM DENGAN PERMANENT
MOLD CASTING

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MATERIAL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



SITI AMALINA AZAHRA
NIM. 145060201111010

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 13 Juli 2018

DOSEN PEMBIMBING I

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

DOSEN PEMBIMBING II

Khairul Anam, ST, M.Sc
NIP 201310 861127 1 002

Mengetahui,
KETUA PROGRAM STUDI S1



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

TURNITIN



**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA**



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 095/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

SITI AMALINA AZAHRA

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH LAJU PENDINGINAN TERHADAP KEKERASAN DAN STRUKTUR MIKRO
PULLEY ALUMINIUM DENGAN PERMANENT MOLD CASTING**

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

16 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

JUDUL SKRIPSI:

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

Nama Mahasiswa : Siti Amalina Azahra
NIM : 145060201111010
Program Studi : Teknik Mesin
Minat : Teknik Material

KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met
Pembimbing II : Khairul Anam, ST., M.Sc

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.
Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Eko Siswanto, ST., MT.
Dosen Penguji 3 : Ir. Suharto, MT.

Tanggal Ujian : 4 Juli 2018
SK Penguji : 1336/UN10.F07/SK/2018



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi di bidang industri, khususnya industri manufaktur di bidang otomotif saat ini berkembang sangat pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan dan permintaan konsumen. Berdasarkan data Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, angka penjualan sepeda motor di Indonesia mencapai tujuh juta unit per tahunnya. Permintaan yang tinggi ini menuntut industri manufaktur untuk melakukan perkembangan dalam berbagai sektor, salah satunya pada sektor material. Menurut (Suharno, 2009) penggunaan komponen kendaraan bermotor berbahan aluminium paduan di Indonesia mencapai 200.000 ton per tahun.

Logam aluminium memiliki sifat – sifat unggul yang membuatnya menjadi logam yang paling banyak digunakan setelah baja. Sifat – sifat tersebut diantaranya adalah ketersediaan di alam yang banyak, memiliki berat jenis yang lebih rendah, ketahanan korosi (*corrosion resistance*) apabila telah membentuk lapisan pasif Al_2O_3 , dan proses manufaktur yang mudah (Nanda, 2010). Salah satu proses manufaktur logam aluminium yang digunakan adalah pengecoran logam. Pengecoran logam merupakan proses pemanasan logam padat hingga melewati titik leburnya, lalu dituang dan dicetak sehingga membentuk geometri yang sesuai dengan desain, kemudian logam dikeluarkan dari rongga cetakan. Pada pengecoran logam, proses pembekuan logam (*solidification*) merupakan salah satu hal yang sangat mempengaruhi ukuran, bentuk, dan keseragaman butir yang akan terbentuk. Sedangkan ukuran, bentuk, serta keseragaman butir atau yang disebut struktur mikro inilah yang akan mempengaruhi sifat mekanik suatu hasil coran secara keseluruhan. Menurut (Suprpto, 2017) struktur mikro hasil coran dapat ditentukan oleh beberapa hal, diantaranya adalah penambahan paduan yang akan mempengaruhi ukuran butir (*grain size refiners addition*) dan penentuan laju pendinginan.

Pada dasarnya, laju pendinginan pada proses pengecoran logam dipengaruhi oleh sifat fisik dan kimiawi dari logam cair tersebut (kemurnian logam, konduktivitas termal logam, dan lain – lain). Namun, laju pendinginan logam juga dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah *freezing range* (selisih antara titik lebur dan titik padat logam pada diagram fasa), luas permukaan cetakan yang digunakan, hingga konduktivitas termal material cetakan (Kalpakjian, 1990).

Laju pendinginan atau laju pembekuan (*solidification rate*) ini akan mempengaruhi struktur mikro material hasil coran, yaitu pada ukuran butir dan *Dendrite Arm Spacing* (DAS) yang akan terbentuk. Hal ini telah dibuktikan oleh Sugita et al. (2015) pada penelitiannya dengan memberi variasi pada temperatur *preheating* cetakan coran. Temperatur *preheating* cetakan coran akan mempengaruhi fluiditas logam cair, dimana fluiditas logam juga akan mempengaruhi struktur mikro hasil coran yang akan terbentuk, yang mana telah dibuktikan oleh (Arifin, 2009) pada penelitiannya. Dan seperti yang telah kita ketahui, bahwa variasi struktur mikro yang akan terbentuk ini akan berpengaruh langsung terhadap sifat mekanik suatu material. (Callister, 2007)

Dengan penjelasan diatas menimbulkan sebuah gagasan bagi penulis untuk melakukan penelitian yang ditujukan untuk mengetahui laju pendinginan optimal pada proses pengecoran dengan menggunakan cetakan permanen. Metode yang digunakan harus mempertimbangkan beberapa hal diantaranya konduktivitas termal material cetakan, dimana faktor ini akan mempengaruhi proses pembekuan logam cair secara langsung. Oleh karena itu, gagasan penelitian yang dilakukan oleh penulis adalah dengan menambahkan material pada cetakan coran yang terletak pada bagian alas dengan nilai konduktivitas termal yang berbeda dengan cetakan permanen yang digunakan. Sehingga dapat diketahui laju pendinginan dengan material tertentu yang dapat menghasilkan hasil coran yang optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan:

1. Bagaimana pengaruh dari laju pendinginan terhadap nilai kekerasan hasil coran?
2. Bagaimana pengaruh dari laju pendinginan terhadap mikrostruktur hasil coran?

1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam materi yang diajukan ini tidak melebar, maka ditetapkan beberapa batasan masalah. Dalam penelitian ini batasan masalahnya sebagai berikut:

1. Analisa mikrostruktur hasil coran yang dibahas hanya mengenai ukuran butiran berdasarkan metode planimetri.
2. Temperatur penuangan logam cair dan temperatur *preheating* cetakan coran dianggap konstan.
3. Temperatur lingkungan pada semua spesimen dianggap sama.
4. Kecepatan penuangan logam cair dianggap sama.

5. Laju pendinginan diseluruh permukaan cetakan coran dianggap sama.

1.4 Tujuan Penelitian

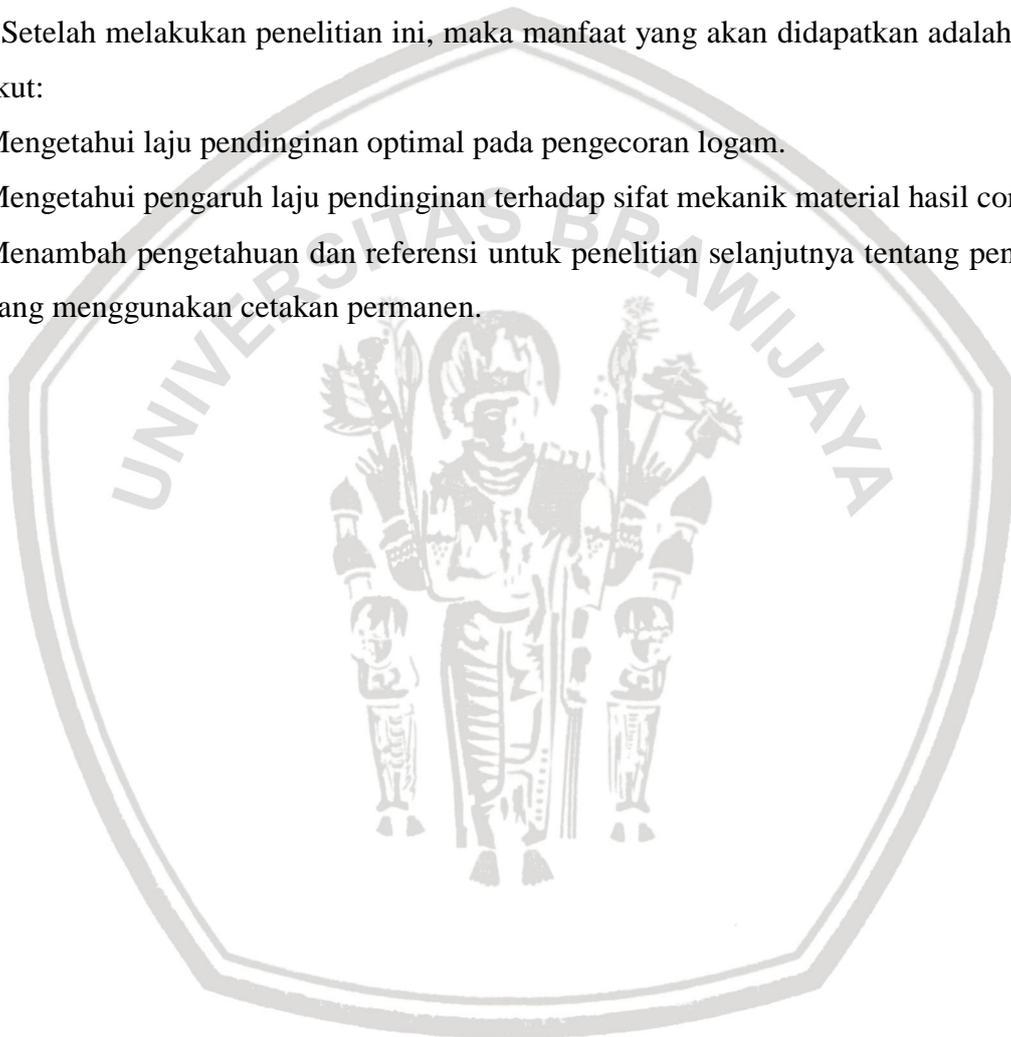
Penelitian yang dilaksanakan memiliki tujuan untuk:

1. Mengetahui pengaruh laju pendinginan terhadap nilai kekerasan hasil coran.
2. Mengetahui ukuran butir pada hasil foto mikrostruktur hasil coran.

1.5 Manfaat Penelitian

Setelah melakukan penelitian ini, maka manfaat yang akan didapatkan adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui laju pendinginan optimal pada pengecoran logam.
2. Mengetahui pengaruh laju pendinginan terhadap sifat mekanik material hasil coran.
3. Menambah pengetahuan dan referensi untuk penelitian selanjutnya tentang pengecoran yang menggunakan cetakan permanen.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Sugita et. al (2015) menerangkan bahwa variasi laju pendinginan pada pengecoran perunggu akan mempengaruhi struktur dendrit yang terbentuk. Ukuran SDAS (*Secondary Dendrite Arm Spacing*) semakin menurun seiring dengan meningkatnya laju pendinginan. Nilai SDAS berpengaruh langsung terhadap sifat mekanik material yaitu semakin kecil nilai SDAS, maka nilai kekerasan akan meningkat. Variasi laju pendinginan dilakukan dengan cara melakukan *preheating* pada cetakan coran yaitu 200 °C dengan laju pendinginan 13.112 °C/s, 300°C dengan laju pendinginan 10.206 °C/s, dan 400 °C dengan laju pendinginan 7.722 °C/s.

Supriyanto (2009) pada penelitiannya memvariasikan laju pendinginan yang dilakukan dengan cara memberikan media pendingin yang berbeda sesaat setelah logam coran memenuhi cetakan. Yaitu dengan dicelupkan ke dalam air sumur, oli SAE 40, dan dibiarkan dalam suhu ruang. Media pendingin udara memiliki laju pendinginan yang lebih lambat jika dibandingkan dengan media pendinginan air sumur dan oli SAE 40 secara berturut – turut. Nilai kekerasan dengan metode Rockwell dari yang paling tinggi adalah air sumur 31.9 HR_b, oli SAE 27.1 HR_b, dan pendinginan udara 24.7 HR_b.

Zhang et al. (2007) pada penelitiannya menerangkan bahwa variasi laju pendinginan pada pengecoran aluminium A356 alloy akan mempengaruhi ukuran DAS (*Dendrite Arm Spacing*) dan nilai kekerasan *microhardness*. Variasi laju pendinginan dilakukan dengan cara memberikan penambahan unsur Sn pada cetakan coran dengan material tembaga. Laju pendinginan 100 °K/s menghasilkan nilai DAS 18 μm dan kekerasan 750 HV, laju pendinginan 200 °K/s menghasilkan nilai DAS 13 μm dan nilai kekerasan 825 HV, laju pendinginan 300 °K/s menghasilkan nilai DAS 11.5 μm kekerasan 880 HV, laju pendinginan 400 °K/s menghasilkan nilai DAS 10 μm kekerasan 910 HV.

Hubungan antara variasi laju pendinginan pada pengecoran aluminium dengan kekerasan material telah dilakukan oleh Pratiwi (2012). Variasi laju pendinginan dilakukan dengan menggunakan cetakan dengan jenis material yang berbeda pada proses pengecoran, yaitu logam (baja), pasir, keramik, dan semen. Nilai kekerasan yang paling tinggi berturut – turut adalah cetakan logam baja dengan konduktivitas termal 36-55 W/m^oK sebesar 68.49-79.61 BHN, cetakan pasir dengan konduktivitas termal 1.93-2.90 W/m^oK sebesar 63.69-

74.67 BHN, cetakan keramik dengan konduktivitas termal $0.69 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ sebesar 49.80-56.88 BHN, dan cetakan semen dengan konduktivitas termal $0.5 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ sebesar 39.50-47.53 BHN.

Darmadi (2015) pada penelitiannya memvariasikan laju pendinginan pada pengecoran besi cor. Variasi dilakukan dengan cara memasukan produk cor ketika berada pada kondisi tepat akan tersolidifikasi (berwarna merah layu) ke dalam media pendinginan yang berbeda yaitu oli, paslin (*grease*) dan udara (temperatur $20\text{-}25 \text{ }^\circ\text{C}$). Nilai kekerasan rata-rata produk cor yaitu pada media pendinginan udara 418.56 HB, paslin (*grease*) 432.64 HB, dan oli 477.20 HB.

2.2 Aluminium

2.2.1 Karakteristik Aluminium

Aluminium merupakan logam ringan dengan nilai *load-to-weight ratio* yang mampu bersaing dengan baja. Aluminium juga mempunyai daya hantar listrik dan hantar panas yang baik, walaupun dalam penggunaannya, aluminium seringkali dipadukan dengan unsur lain untuk meningkatkan sifat mekaniknya. Penambahan unsur yang umumnya dipadukan seperti Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni dan unsur lainnya ini berdampak langsung pada sifat fisik maupun mekanik aluminium, seperti ketahanan korosi apabila telah membentuk lapisan pasif Al_2O_3 , ketahanan aus apabila dipadukan dengan logam tertentu, penurunan koefisien pemuaian, meningkatkan kekuatan tarik dan sebagainya. Oleh karena itu, material aluminium luas digunakan dalam berbagai bidang diantaranya adalah industri pesawat terbang, industri mobil, industri kapal laut, peralatan rumah tangga, dan lain-lain.

Aluminium didapatkan dalam keadaan cair melalui proses elektrolisa. Umumnya kemurnian aluminium mencapai 99,85% dari berat totalnya. Kemurnian 99,99% dapat diperoleh dengan cara mengelektrolisa ulang aluminium tersebut. Aluminium murni ini bersifat sangat ulet dan struktur kristal yang dimilikinya adalah FCC.

Berikut tabel 2.1 yang menjelaskan secara singkat sifat fisik dari aluminium murni.

Tabel 2.1.
Sifat Fisik Aluminium Murni

Sifat – Sifat	Kemurnian Al (%)	
	99,996	< 99,0
Massa Jenis pada Temperatur 20 °C [g/cm ³]	2,6989	2,71
Titik Cair [°C]	660,2	653 – 657
Panas Jenis pada Temperatur 100 °C [cal/g°C]	0,2226	0,2297
Hantaran Listrik [%]	64,94	59 (<i>annealed</i>)
Koefisien Temperatur Penghantar Listrik pada Temperatur Ruang 20 °C [°K]	0,00429	0,0115
Koefisien Pemuai pada Temperatur 20-100 °C [°C]	23,86 x 10 ⁻⁶	23,5 x 10 ⁻⁶
Jenis Kristal, konstanta kisi	FCC, a = 4,013 kX	FCC, a = 4,04 kX

Sumber : Surdia & Saito (2013,p.134)

Seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1, aluminium memiliki keunggulan dalam sifat fisik begitu juga dengan sifat mekaniknya. Jenis paduan dan juga kemurnian dapat mempengaruhi sifat mekanik aluminium murni. Perlakuan yang diberikan pada aluminium dapat diketahui dari kode huruf yang berada di belakang kode paduan, yaitu: O untuk *annealing*, F untuk *as cast*, W untuk *solution heat treated*, H untuk *strain hardening*, dan T untuk *thermally treated*. Berikut tabel 2.2 yang menunjukkan sifat mekanik dari aluminium murni.

Tabel 2.2.
Sifat Mekanik Aluminium

Sifat	Kemurnian Al (%)			
	99,996		< 99	
	<i>Annealed</i>	<i>75% cold rolled</i>	<i>Annealed</i>	H18
Kekuatan tarik [Kg/mm ²]	4,9	11,6	9,3	16,9
Kekuatan mulur 0,2% [Kg/mm ²]	1,3	11,0	3,5	14,8
Perpanjangan [%]	48,8	5,5	35	5
Kekerasan brinell [BHN]	17	27	23	44

Sumber : Surdia & Saito (2013, p.134)

2.2.2 Proses Pembuatan Aluminium

Aluminium pertama kali ditemukan oleh Sir Humphrey pada tahun 1809 sebagai suatu unsur, dan pertama kali direduksi sebagai logam oleh H. C. Oersted pada tahun 1825. Setelah itu pada tahun 1886, Paul Heroult di Perancis dan C. M. Hall di Amerika Serikat secara terpisah telah memperoleh logam aluminium dari alumina dengan cara mengelektrolisa dari garamnya yang terfusi, kemudian dikenal sebagai sebuah proses pembuatan aluminium yang bernama Hall-Heroult. (Surdia & Saito, 2013)

Tahapan pembuatan aluminium dimulai dari pemrosesan bijih aluminium atau lebih dikenal dengan bauksit. Bauksit merupakan oksida dari aluminium dan terdapat dalam 2 bentuk, yaitu *carstic bauxite* dan *lateritic bauxite*. *Carstic bauxite* sebagian besar terdiri dari alumina monohidrat ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), sedangkan *lateritic bauxite* sebagian besar terdiri atas alumina trihidrat ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Di Indonesia, bauksit banyak ditemukan di Pulau Bintan, Bangka - Belitung, dan Sumatra.

Bauksit yang telah dimurnikan kemudian diolah untuk menjadi alumina murni melalui proses Bayer yang kemudian dilanjutkan dengan proses Hall-Heroult guna menghasilkan aluminium. Untuk menghasilkan 0.45 kg aluminium primer (kurang lebih kemurnian Al adalah 95%) dengan proses Bayer dan Hall-Heroult, diperlukan 22.67 kg aluminium cair yang didapatkan dari proses akhir Hall-Heroult, 0.9 kg alumina, 0.34 kg elektroda karbon, dan energi sebesar 12 kWh. (Pollack, 1981)

Aluminium murni mempunyai sifat mampu cor dan sifat mekanis yang kurang baik. (Surdia & Chijiwa, 1996). Oleh karena itu, dipergunakan paduan aluminium karena sifat-sifat mekanisnya akan diperbaiki dengan menambahkan tembaga, magnesium, mangan, nikel, dan sebagainya. Coran paduan aluminium memiliki sifat ringan dan merupakan penghantar panas yang baik.

2.2.3 Aluminium dan Paduannya

Aluminium Association of America (AA) menetapkan standar penamaan untuk paduan aluminium pada tahun 1957, standar ini merupakan penyempurnaan dari bentuk penamaan sebelumnya oleh *Aluminium Company of America* (ALCOA). Secara garis besar terdapat dua kelas utama dalam pengelompokan paduan aluminium, yaitu aluminium tuang (*cast aluminium*) dan aluminium pengerjaan (*wrought aluminium*). Berikut tabel 2.3 yang menunjukkan sistem penamaan pada paduan aluminium menurut standar AA.

Tabel 2.3.
Sistem Penamaan Paduan Aluminium

Seri	Cast Aluminium	Seri	Wrought Aluminium
	Unsur Paduan		Unsur Paduan
1xx.x	99,0% min. Al	1xxx	99,0% min. Al
2xx.x	Al-Cu	2xxx	Cu
3xx.x	Al-Si-Mg, Al-Si-Cu, Al-Si-Cu-Mg	3xxx	Mn
4xx.x	Al-Si	4xxx	Si
5xx.x	Al-Mg	5xxx	Mg
7xx.x	Al-Zn	6xxx	Mg dan Si
8xx.x	Al-Sn	7xxx	Zn
		8xxx	Selain unsur di atas
		9xxx	Tidak digunakan

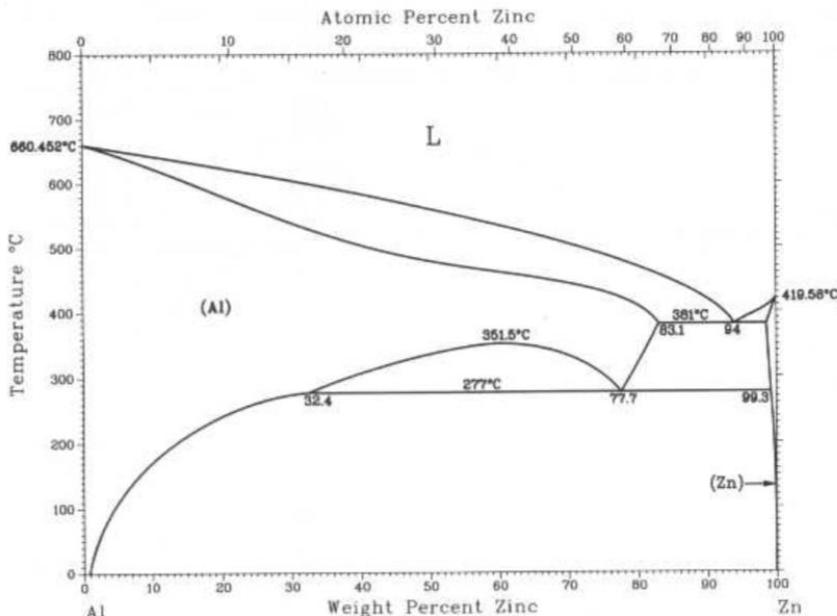
Sumber : (ASM International, 1990)

Seperti yang terlihat pada tabel diatas, sistem penamaan paduan aluminium tuang menggunakan sistem registrasi 3 angka dengan urutan berdasarkan unsur paduannya. Untuk seri 2xx.x hingga 8xx.x, angka pertama menunjukkan kelompok paduan, yang ditentukan berdasarkan persentase unsur paduan utama yang memiliki nilai terbesar. Angka kedua dan ketiga menunjukkan jenis spesifikasi komposisi aluminium paduan tersebut. Angka keempat yang terletak dibelakang tanda desimal menyatakan bentuk produk, 0 untuk spesifikasi produk coran, 1 untuk spesifikasi produk ingot (batang), dan 2 untuk produk ingot yang lebih spesifik. Misal, xxx.0 mewakili batasan komposisi kimia dari paduan hasil pengecoran.

Sistem penamaan paduan aluminium pengerjaan (*wrought aluminium*) menggunakan sistem registrasi 4 angka. Angka pertama menunjukkan unsur paduan utama pada aluminium tersebut. Angka kedua menunjukkan adanya modifikasi dari unsur yang ada dan biasanya ditunjukkan dengan angka 1-9. Sebagai contoh, pada seri 1xxx, dua angka terakhir menunjukkan kadar minimum aluminium pada paduan dalam 99,00%. Pada seri 2xxx sampai dengan seri 8xxx, dua angka terakhir menyatakan kandungan unsur paduan utamanya.

Paduan Al-Zn dengan seri 7xxx pada jenis *wrought*, dan 7xx.x pada jenis *cast* merupakan jenis paduan yang umum digunakan pada komponen dasar pesawat terbang (*airframe*), komponen mobil, dan komponen lainnya yang terkena tegangan tinggi. Jumlah Zinc yang dipadukan pada umumnya berkisar antara 1 – 8 % sebagai paduan utama dan dengan penambahan Magnesium sebagai paduan minor untuk menghasilkan paduan

aluminium yang dapat mengalami perlakuan panas. Paduan Al-Zn menunjukkan ketahanan terhadap *stress corrosion cracking* dan seringkali digunakan pada perlakuan panas *overaged temper* untuk meningkatkan kekuatan, ketahanan korosi, dan *fracture toughness*. Diagram fasa biner paduan Al-Zn dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Diagram fasa biner Al-Zn
Sumber : ASM Handbook Vol. 3 (1990,p.89)

2.3 Diagram Fasa

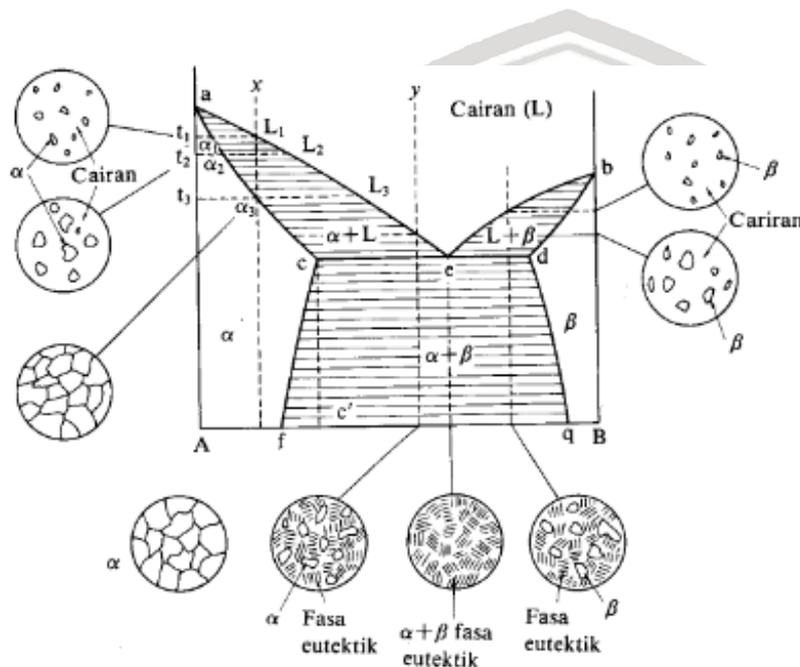
2.3.1 Pengertian dan Klasifikasi Diagram Fasa

Setiap logam memiliki sifat tertentu yang dapat berubah dikarenakan perubahan fasanya. Fasa atau *phase* dalam pengertian mikrostuktur adalah suatu daerah yang memiliki struktur (bentuk atau ukuran) dan ataupun komposisi (unsur) yang sama pada sistem tertentu. Informasi mengenai berbagai perubahan fasa pada banyak sistem paduan logam telah dilakukan, salah satu metode yang digunakan adalah dengan menggambarkan diagram fasa, yang juga dikenal sebagai diagram konstituen, atau diagram *equilibrium*. (Avner, 1974)

Diagram fasa telah digunakan secara luas oleh ahli metalurgi ataupun ilmuwan material, pada umumnya di bidang pengembangan material paduan baru untuk tujuan produksi tertentu, sebagai acuan dasar untuk melakukan proses perlakuan panas suatu material, ataupun untuk menyelesaikan berbagai permasalahan mengenai kualitas suatu material paduan. Diagram fasa digambarkan ketika suatu paduan berada pada keadaan *equilibrium* atau seimbang, yang berarti tidak terdapat perubahan kondisi terhadap satuan waktu. Untuk menetapkan kondisi seimbang atau tidaknya suatu sistem paduan, dibutuhkan

untuk menentukan tiga variabel bebas terlebih dahulu yaitu, temperatur, tekanan, dan komposisi paduan. Dengan mengasumsikan tekanan atmosfer adalah konstan, diagram fasa dapat diartikan sebagai tampilan grafis perubahan struktur dan ataupun komposisi terhadap variasi temperatur dan komposisi paduan tertentu pada kondisi *equilibrium*.

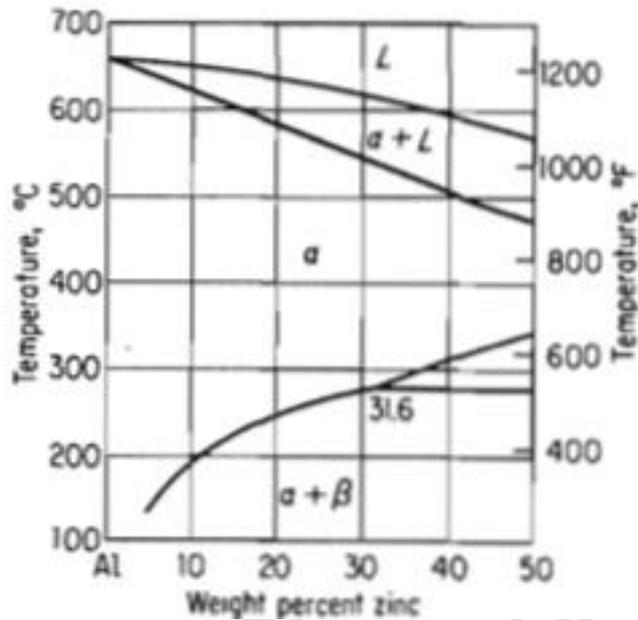
Berdasarkan jumlah unsur yang dipadukan, diagram fasa terbagi menjadi *binary phase diagram* yang terdiri dari dua unsur paduan dan *ternary phase diagram* yang terdiri dari tiga unsur paduan. Berikut adalah contoh diagram fasa biner dan transformasinya selama pendinginan yang terdapat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Diagram fasa biner selama pendinginan
Sumber : Surdia & Saito (2013,p.57)

2.3.2 Diagram *Binary Al-Zn*

Paduan Al-Zn memiliki kandungan Zn sebesar 31.6% pada temperatur 275 °C, menurun ke 5.6% pada 125 °C. Paduan Al-Zn yang dipasarkan pada umumnya mengandung Zn, Mg, dan Cu dengan penambahan Cr sebagai paduan minor. Paduan komersial Al-Zn misalnya A7075, mengandung 5.5% Zn, 2.5% Mg, dan 1.5% Cu, A7079, dan A7178 memiliki kekuatan tarik tertinggi dibandingkan dengan paduan aluminium lainnya. Paduan ini juga memiliki kerentanan terhadap *stress corrosion* yang lebih rendah dengan penambahan Cr dan perlakuan panas. Biasa paduan ini diaplikasikan pada komponen pesawat terbang, yang membutuhkan kekuatan tinggi dan ketahanan korosi yang baik. Diagram fasa biner paduan Al-Zn dapat dilihat pada gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Diagram fasa *binary* Al-Zn

Sumber : Avner (1974,p.492)

2.4 Proses Produksi Logam

2.4.1 Definisi Pengecoran Logam

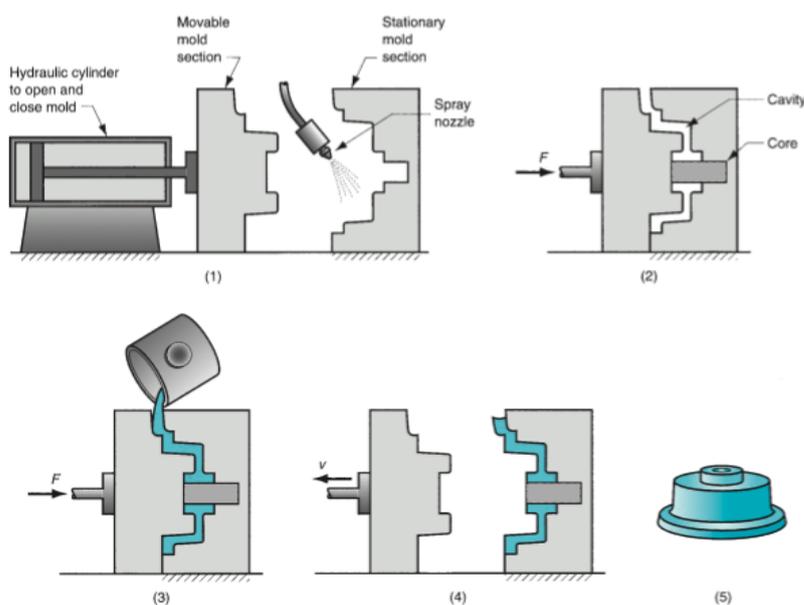
Pengecoran logam merupakan salah satu metode proses produksi logam dengan cara membentuk geometri komponen yang diinginkan secara langsung. Proses pengecoran adalah proses yang memberikan fleksibilitas dan kemampuan yang tinggi sehingga merupakan proses yang penting dalam pengembangan industri. Dalam sistem industri sendiri, proses pengecoran diklasifikasikan menjadi beberapa jenis menurut bentuk bahan dasar yang digunakan. Apabila bentuk bahan dasar padat – cair, bahan dimasukkan ke dalam cetakan dan di *pressing*, proses ini dikenal dengan nama *thixoforming*. Apabila bentuk bahan dasar cair – padat (*slurry*), bahan dituang ke dalam rongga cetakan dan dibiarkan membeku (membentuk struktur globular), proses ini dikenal dengan nama *rheocasting*. Apabila bentuk bahan 100% cair, bahan dituang ke dalam rongga cetakan dan dibiarkan membeku (membentuk struktur dendritik), proses ini dikenal dengan nama pengecoran konvensional. (Suprpto, 2017)

Pengecoran konvensional dilakukan dengan cara meleburkan logam dengan temperatur 50 °C – 100 °C di atas titik leburnya, kemudian memasukan logam ke dalam cetakan. Cairan logam tersebut akan menyesuaikan dengan bentuk rongga cetakan sehingga didapatkan bentuk yang sesuai dengan cetakan setelah cairan logam tersebut membeku.

2.4.2 Permanent Mold Casting

Secara umum pengecoran diklasifikasikan berdasarkan bahan cetaknya yaitu *expendable mold casting* dan *permanent mold casting*. *Expendable mold casting* adalah cetakan yang hanya dipakai untuk sekali proses pengecoran dikarenakan pada penggunaannya cetakan harus dirusak untuk mendapatkan hasil coran. Bahan cetakan yang digunakan umumnya adalah pasir, gips, keramik, dan material sejenis yang dicampur bahan pengikat.

Permanent mold casting adalah jenis pengecoran yang menggunakan cetakan permanen yang umumnya terbuat dari baja atau logam tahan panas lainnya, cetakan ini bisa dipakai hingga berulang kali. Dengan cetakan ini, dihasilkan permukaan produk cor yang halus. Inti (*core*) dapat juga menggunakan logam permanen, namun inti tersebut harus bisa dilepaskan setelah logam cair membeku. Proses pengecoran yang paling umum digunakan adalah dengan memanfaatkan gravitasi bumi untuk mengisi cetakan, namun tekanan gas atau vakum juga seringkali digunakan. Gambar 2.4 berikut merupakan tahapan dasar proses pengecoran dengan *permanent mold casting*.



Gambar 2.4 Tahapan dasar pengecoran *permanent mold casting*
Sumber : Groover (2010,p.238)

Adapun tahapan dasar pengecoran *permanent mold casting* pada Gambar 2.4 adalah sebagai berikut :

1. *Preheating* dan pelapisan cetakan coran. Proses *preheating* membantu logam cair mengalir dan memenuhi rongga cetakan dikarenakan gradien temperatur cetakan logam dan logam cair tidak terlalu tinggi. Adapun proses pelapisan cetakan membantu

pembuangan kalor pada cetakan dan sebagai pelumas sehingga hasil coran dapat lebih mudah untuk dilepaskan.

2. Pemasangan inti (*core*) bila ada.
3. Penuangan logam cair ke dalam cetakan.
4. Pelepasan hasil cor dari cetakan coran.
5. Hasil cor ditunjukkan pada poin (5).

2.4.3 Peleburan

Peleburan logam merupakan suatu proses melelehkan logam pada titik leburnya dengan menggunakan energi panas yang dihasilkan oleh tungku peleburan. Pada proses pengecoran, logam dilebur untuk selanjutnya dituang ke dalam cetakan sehingga logam cair mengisi rongga pada cetakan. Kualitas produk coran dipengaruhi oleh proses ini, oleh karena itu proses peleburan merupakan aspek terpenting dalam proses pengecoran.

Temperatur peleburan mengacu pada masing – masing titik cair (*melting point*) unsur apabila menggunakan logam murni, atau garis *liquidus* pada diagram fasa apabila menggunakan logam paduan. Untuk menentukan temperatur cair suatu paduan logam menggunakan diagram fasa dari paduan itu sendiri, dimana kita harus mengetahui kadar dari masing-masing unsur dalam paduan terlebih dahulu. Berikut tabel 2.4 yang menunjukkan nilai titik cair pada beberapa jenis material.

Tabel 2.4.
Titik Lebur Logam

Bahan	Titik Cair (°C)
Air	0
Air Raksa	-38,9
Timah	232
Timbal	327
Seng	420
Aluminium	660
Tembaga	1.083
Besi	1.537
Besi Cor	1.170

Sumber : Surdia & Chijiwa (1996, p.12)

2.4.4 Solidifikasi

2.4.4.1 Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal secara umum dapat diartikan sebagai kemampuan suatu material untuk menghantarkan panas. Secara khusus, konduktivitas termal dapat diartikan sebagai laju perpindahan panas yang melewati satuan ketebalan tertentu pada suatu material per satuan luas per satuan gradien temperatur. Semakin tinggi nilai konduktivitas termal suatu material, maka material tersebut merupakan penghantar panas yang baik. Sebaliknya, material yang memiliki nilai konduktivitas termal yang rendah bersifat penghantar panas yang buruk atau disebut isolator. (Cengel, 2004)

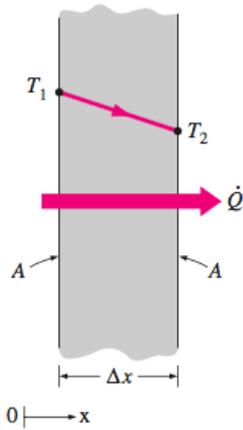
Adapun nilai konduktivitas termal k pada beberapa material pada temperatur ruangan terdapat pada Tabel 2.5. berikut.

Tabel 2.5.
Konduktivitas Termal Material pada Temperatur Ruangan

Material	k [W/m°C]
Diamond	2300
Silver	429
Copper	401
Gold	317
Aluminium	237
Iron	80.2
Mercury (l)	8.54
Glass	0.78
Brick	0.72
Water (l)	0.613

Sumber : Cengel (2004,p.20)

Berdasarkan tabel diatas, nilai konduktivitas termal tembaga murni pada temperatur ruangan adalah 401 W/m°C, yang mana berarti sebuah tembaga dengan ketebalan 1m mampu menghantarkan panas sebesar 401 W pada luas penampang 1m² pada perbedaan temperatur °C. Adapun nilai konduktivitas termal dipengaruhi oleh laju perpindahan panas secara konduksi yang mana bergantung pada fase media penghantar panas, ketebalan dan jenis media penghantar, dan gradien temperatur. Skema perpindahan panas konduksi ditunjukkan pada gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Perpindahan panas konduksi
 Sumber : Cengel (2004,p.18)

Dimana T_1 dan T_2 adalah gradien temperatur pada penampang melintang sebuah media penghantar panas, A adalah luas penampang yang tegak lurus dengan arah perpindahan panas, dan Δx merupakan ketebalan media penghantar. Dengan asumsi laju perpindahan panas \dot{Q} terjadi pada kondisi *steady*, maka laju perpindahan panas konduksi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [\text{W}] \dots\dots\dots (2-1)$$

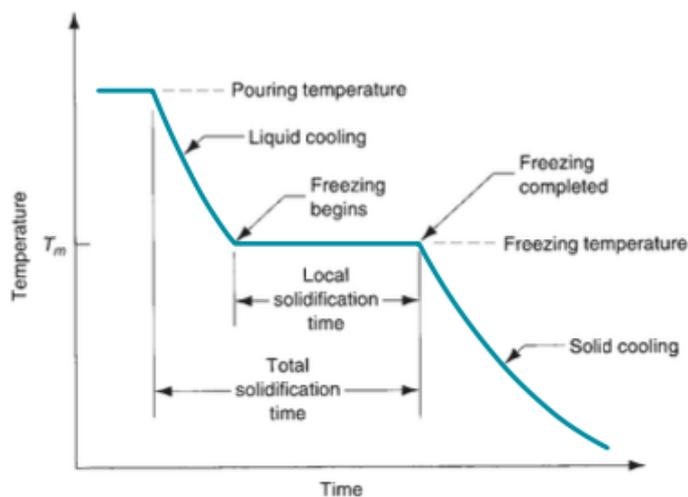
Keterangan :

- k = Konduktivitas termal [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]
- A = Luas penampang melintang [m^2]
- ΔT = Gradien temperatur [$^\circ\text{C}$]
- Δx = Ketebalan media penghantar [m]

2.4.4.2 Laju Solifidikasi

Pada proses pengecoran, sebuah logam murni akan tersolidifikasi tepat pada temperatur pembekuannya (sama dengan temperatur pendinginan). Waktu aktual terjadinya proses solidifikasi ditunjukkan dengan kalor laten fusi yang terjadi pada temperatur tertentu yang konstan. Sedangkan waktu total terjadinya proses solidifikasi ditunjukkan dengan total waktu yang dibutuhkan mulai dari proses penuangan, penurunan temperatur logam cair, hingga kalor laten fusi selesai terjadi pada logam cair (sepenuhnya tersolidifikasi). Setelah logam cair sepenuhnya tersolidifikasi, proses pendinginan berlanjut yang ditunjukkan dengan garis miring kebawah pada diagram proses laju pendinginan. Adapun diagram proses laju pendinginan terdapat pada gambar 2.6 berikut.



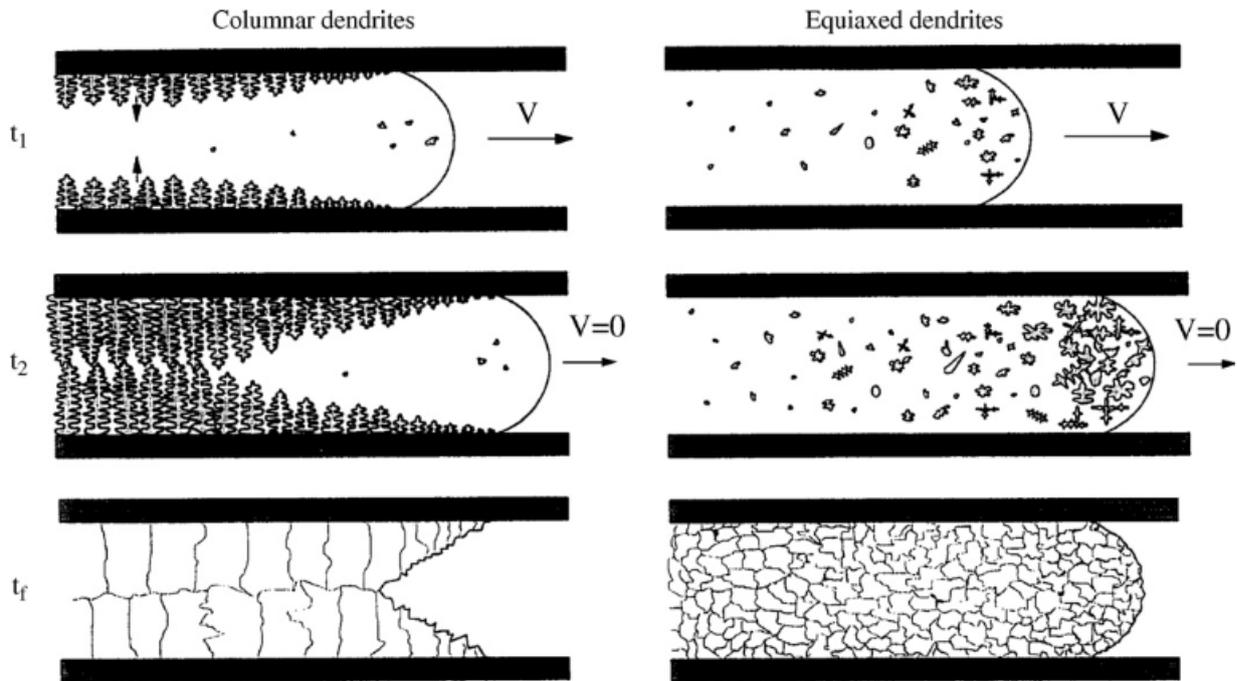


Gambar 2.6 Diagram proses laju pendinginan
Sumber : Groover (2010,p.214)

2.4.4.3 Mekanisme Solidifikasi

Proses solidifikasi dalam proses pengecoran logam merupakan aspek yang penting dalam hal menentukan ukuran, bentuk, homogenitas, dan komposisi kimia butiran, yang mana akan berdampak langsung pada karakteristik produk coran. Dalam proses solidifikasi logam cair, mula-mula tumbuh inti-inti kristal. Kemudian kristal-kristal tersebut tumbuh di sekeliling inti, dan disusul tumbuhnya inti-inti lain. Pada akhirnya, seluruhnya ditutupi oleh butir kristal sampai logam cair sepenuhnya membeku. Hal ini mengakibatkan seluruh bagian logam menjadi suatu susunan butir dan batas butir. Ukuran butir kristal tergantung pada laju pendinginan dan pertumbuhan inti. Ketika laju pertumbuhan lebih besar dari laju pendinginan, maka didapatkan butiran yang besar demikian sebaliknya.

Metode solidifikasi diklasifikasikan berdasarkan struktur butiran yang terbentuk. Adapun struktur yang terbentuk pada saat solidifikasi logam salah satunya dipengaruhi oleh komposisi logam cair. Komposisi logam murni pada umumnya memiliki fluiditas yang tinggi, sehingga proses solidifikasi mula-mula terjadi pada logam yang bersentuhan dengan permukaan cetakan, kemudian butiran tumbuh dengan arah berlawanan dengan panas yang keluar dari cetakan. Butiran ini disebut butiran *columnar*. Adapun pada logam paduan, proses solidifikasi terjadi karena terhambatnya aliran logam cair oleh kristal yang tumbuh secara acak, sehingga fluiditas logam cair berkurang dan kemudian sepenuhnya tersolidifikasi. Butiran yang dihasilkan dari proses ini disebut butiran *equiaxed*. Bentuk butir *columnar* dan *equiaxed* ditunjukkan pada gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7. Bentuk butir *columnar* dan *equiaxed*
 Sumber : Ravi et al. (2007,p.207)

2.4.4.3 Short Freezing Range Cooling

Metode solidifikasi ini terjadi ketika logam cair adalah logam murni. Logam murni memiliki titik lebur dan titik beku tertentu, oleh karena itu, proses solidifikasi pada logam murni terjadi pada temperatur konstan. Misalnya pada aluminium murni, logam mulai membeku ketika temperaturnya tepat 660 °C

Pada metode solidifikasi *short freezing range*, solidifikasi mula-mula terjadi pada logam yang bersentuhan dengan permukaan cetakan, kemudian bergerak ke tengah seiring dengan mengalirnya logam cair di dalam cetakan. Logam cair yang telah membeku yang berada paling dekat dengan logam cair akan mencair kembali (*remelting*), sehingga area solidifikasi merambat secara teratur dari area yang paling dekat hingga yang paling jauh dengan logam cair. Aliran logam cair akan sepenuhnya terhenti ketika kedua sisi bagian yang membeku bertemu (lihat Gambar 2.7). Berikut adalah rumusan fluiditas:

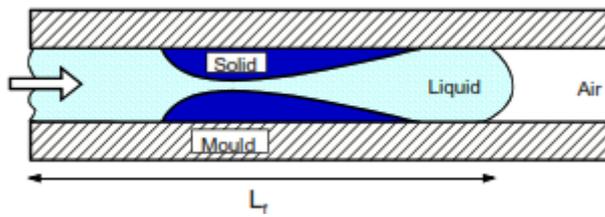
$$L_f = V \cdot t_s \dots \dots \dots (2-2)$$

Keterangan :

- t_s = Waktu solidifikasi
- v = Laju aliran
- L_f = Jarak fluiditas

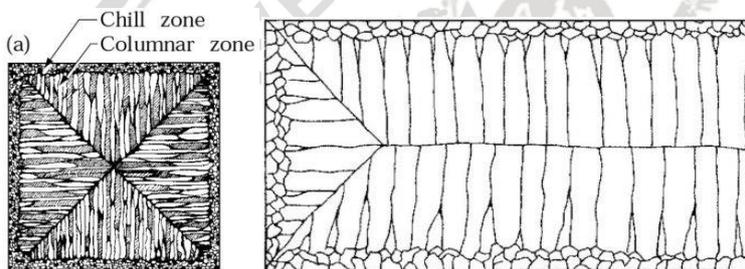
Adapun skema *Short Freezing Range Cooling* terdapat pada gambar 2.8 berikut.





Gambar 2.8 Skema *short freezing range cooling*
Sumber : Campbell (1994)

Pada *short freezing range cooling*, struktur butir yang dihasilkan pada permukaan cetakan adalah *fine equiaxed grain*, karena pada permukaan ini terjadi proses pendinginan cepat (*rapid cooling*). Adapun butir yang tumbuh dengan arah yang berlawanan dengan perpindahan panas menghasilkan *columnar grain*. Ukuran dan bentuk butir yang dihasilkan ini sangat dipengaruhi oleh laju dan arah perpindahan panas (konveksi). Struktur mikro butir pada *short freezing range cooling* dapat dilihat pada gambar 2.9 berikut.



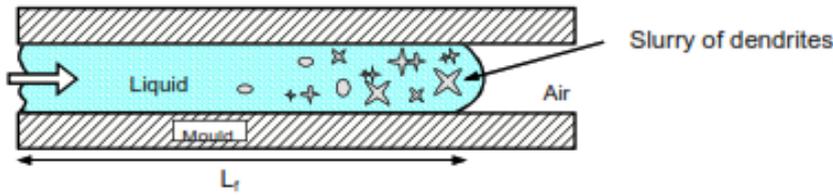
Gambar 2.9 Struktur mikro *short freezing range cooling*
Sumber : Kalpakjian (1990,p.279)

2.4.4.4 Long Freezing Range Cooling

Metode solidifikasi ini terjadi apabila logam cair adalah logam paduan. Pada logam paduan, solidifikasi terjadi pada rentang temperatur tertentu, yaitu dimulai ketika temperatur berada di bawah garis *liquidus* dan berakhir ketika logam cair telah mencapai temperatur dibawah garis *solidus*. Diantara rentang temperatur tersebut, terdapat *mushy zone* atau daerah dimana terdapat logam cair yang telah tersolidifikasi namun belum sempurna (membentuk *solid-solution*) dengan bentuk butir dendrit *columnar* atau *equiaxed*, dan logam yang masih berfase cair yang berada diantara dendrit-dendrit tersebut. (Kalpakjian, 1990)

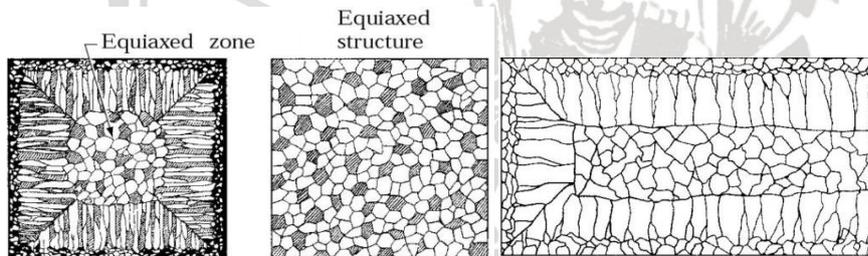
Pada *long freezing range cooling*, proses solidifikasi dimulai ketika temperatur berada di bawah garis *liquidus*, aliran turbulen yang terjadi pada logam cair mengakibatkan logam cair bergerak berputar diantara dendrit-dendrit, membawa logam cair ke daerah yang lebih dingin, dengan demikian lengan-lengan dendrit mengalami pencairan kembali (*remelting*), yang menghasilkan *mushy zone* dan puing-puing dendrit. Seiring dengan

menurunnya temperatur, *mushy zone* meningkat kekentalannya hingga tidak dapat mengalir lagi dan proses solidifikasi terhenti (telah mencapai garis *solidus*). Adapun skema *long freezing range cooling* terdapat pada gambar 2.10 berikut.



Gambar 2.10 Skema *long freezing range cooling*
 Sumber : Campbell (1994)

Bentuk butir yang dihasilkan pada *long freezing range cooling* adalah butir *equiaxed* yang terletak pada bagian dalam produk cor. Bentuk butir ini dihasilkan karena adanya penurunan gradien temperatur, yang mana akan menghilangkan perpindahan panas konveksi yang terjadi pada logam cair. Struktur mikro butir pada *long freezing range cooling* dapat dilihat pada gambar 2.11 berikut.



Gambar 2.11 Struktur mikro *long freezing range cooling*
 Sumber : Kalpakjian (1990,p.279)

2.5 Sifat Mekanik Logam

2.5.1 Pengertian dan Klasifikasi Sifat Mekanik

Sifat mekanik material menggambarkan kemampuan suatu material apabila diberikan gaya dari luar. Sifat mekanik material diteliti ketika material tersebut diasumsikan bersifat kontinu, homogen, dan isotropik. Kontinu berarti tidak terdapat rongga (*void*), homogen berarti memiliki sifat yang identik di semua titik, dan isotropik berarti memiliki sifat yang tidak berubah terhadap arah ataupun orientasi pembebanan. Berikut merupakan beberapa sifat mekanik material :

1. Kekuatan Tarik (*tensile strength*) adalah kemampuan suatu material untuk terdeformasi plastis apabila diberikan beban aksial hingga tegangan tertingginya sebelum material tersebut patah.
2. Kekerasan (*hardness*) adalah ketahanan suatu material terhadap goresan, penekanan atau indentasi, dan pantulan yang mengakibatkan material tersebut terdeformasi secara plastis. Bila suatu material diindentasi maka yang akan menerima beban adalah bagian permukaannya saja.
3. Ketangguhan (*toughness*) adalah kemampuan material atau bahan untuk menyerap energi dalam sampai terjadinya patah atau rusak.
4. Keuletan (*ductility*) adalah suatu sifat kemampuan material untuk menerima tegangan hingga terjadi deformasi plastis sebelum patah.

2.5.2 Pengujian Sifat Mekanik Logam

2.5.2.1 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan merupakan salah satu jenis pengujian sifat mekanik yang bersifat meninggalkan jejak pada spesimen uji atau bersifat merusak (*destructive test*). Pengujian ini luas digunakan untuk inspeksi dan kontrol kualitas. Pada umumnya, prosedur pengujian dan persiapan pengujian kekerasan mudah, dan hasil nilai kekerasan dapat digunakan langsung untuk memperkirakan sifat mekanik lainnya pada material. Berdasarkan prosedurnya, pengujian kekerasan diklasifikasikan menjadi tiga yaitu pengujian ketahanan terhadap pantulan, pengujian ketahanan terhadap goresan (abrasi), dan pengujian terhadap penekanan (indentasi).

Pengujian penekanan atau indentasi dilakukan dengan cara melakukan penekanan pada spesimen uji yang terletak pada penampang yang kaku. Penekan atau indenter memiliki bentuk dan ukuran tertentu yang telah terstandarisasi dengan nilai pembebanan statis tertentu. Nilai kekerasan yang ditunjukkan berbanding terbalik dengan kedalaman jejak indentasi apabila diberikan pembebanan tertentu, atau berbanding lurus dengan beban rata-rata pada luasan bekas indentasi. (Avner, 1974)

Berdasarkan jenis indenter dan pembebanannya, metode pengujian kekerasan penekanan atau indentasi diklasifikasikan sebagai berikut :

1. Metode Brinell

Pengujian kekerasan metode Brinell merupakan metode pengujian kekerasan dengan indenter berbentuk bola baja dengan diameter 10 mm yang ditekan pada permukaan material uji. Pembebanan yang diberikan pada

metode Brinell sebesar 3000 kg selama 10 s untuk logam *ferrous*, dan 500 kg selama 30s untuk logam *non-ferrous*. Nilai kekerasan Brinell atau Brinell *Hardness Number* (BHN) dapat dirumuskan sebagai berikut :

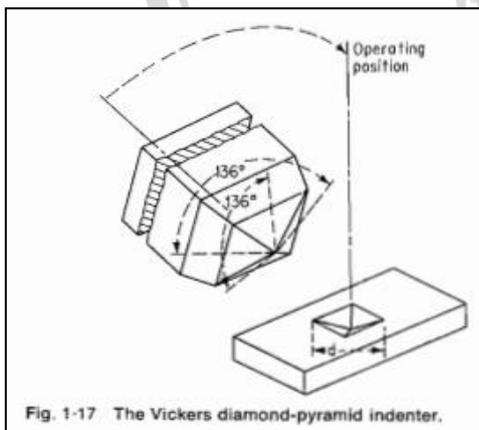
$$BHN = \frac{L}{\left(\frac{\pi D}{2}\right)\{D - \sqrt{D^2 - d^2}\}} \dots\dots\dots(2-3)$$

Keterangan :

- BHN = Nilai kekerasan Brinell [*kg/mm²*]
- L = Beban [kg]
- D = Diameter bola / indentor [mm]
- d = Diameter lekukan / jejak indentor [mm]

2. Metode Vickers

Pengujian dengan metode Vickers menggunakan indentor intan berbentuk piramida dengan sudut 136 derajat. Menurut standarnya, pembebanannya sebesar 1 – 120 kg. Prinsip pengujian metode ini hampir sama dengan metode Brinell, namun bekas indentasi yang dihasilkan berbentuk bujur sangkar berdiagonal. Pengujian dengan metode ini diaplikasikan untuk material yang tipis (memiliki ketebalan 0,005 hingga 0,01 inch), pelapisan *electroplating*, dan material yang permukaannya telah di *case-hardened*. Adapun dimensi indentor pengujian Vickers terdapat pada gambar 2.12 berikut.



Gambar 2.12 Indentor pengujian Vickers
 Sumber : Avner (1974,p.31)

Nilai kekerasan Vickers atau Vickers *Hardness Number* (VHN) dapat dirumuskan sebagai berikut :



$$VHN = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = \frac{1,854P}{d^2} \dots\dots\dots(2-4)$$

Keterangan:

- VHN = Nilai kekerasan Vickers [kg/mm²]
 P = Beban yang dikenakan pada spesimen [kg]
 d = Panjang diagonal indentasi [mm]

3. Metode Rockwell

Berbeda dengan metode Brinell dan Vickers dimana kekerasan suatu material dinilai dari diameter/diagonal jejak yang dihasilkan, maka metode Rockwell nilai kekerasan dihitung berdasarkan pembacaan langsung perbedaan kedalaman jejak indentasi. Pada metode Rockwell terdapat dua tipe beban yaitu:

- *Minor load*, yaitu beban yang digunakan untuk menentukan posisi dari indentor di permukaan spesimen. Besar minor load sebesar 10 kg pada metode Rockwell biasa dan 3 kg pada *Superficial Rockwell Tester*.
- *Major load*, yaitu beban yang digunakan untuk memberikan jejak indentasi yang digunakan untuk pengukuran nilai kekerasan.

Adapun klasifikasi pengujian Rockwell terdapat pada tabel 2.6 berikut.

Tabel 2.6
Klasifikasi Pengujian Rockwell

Skala	Beban Mayor [kg]	Jenis Indentor	Jenis Material Uji
A	60	Kerucut intan	Material sangat keras seperti karbida tungsten, dll.
B	100	Bola baja 1/16"	Material kekerasan sedang, baja karbon rendah dan sedang, kuningan, perunggu, dll.
C	150	Kerucut intan	Baja <i>hardening</i> , material <i>hardening</i> dan <i>tempering</i>
D	100	Kerucut intan	Baja <i>case-hardened</i>
E	100	Bola baja 1/8"	Besi cor, paduan Aluminium dan Magnesium
F	60	Bola baja 1/16"	Kuningan dan tembaga yang di <i>annealing</i>
G	150	Bola baja 1/16"	Berilium-tembaga, fosfor perunggu
H	60	Bola baja 1/8"	Lembaran Auminium
K	150	Bola baja 1/8"	Besi cor, paduan Aluminium
L	60	Bola baja 1/4"	Polimer dan logam lunak seperti timah
M	100	Bola baja 1/4"	Seperti skala L
P	150	Bola baja 1/4"	Seperti skala L
R	60	Bola baja 1/2"	Seperti skala L
S	100	Bola baja 1/2"	Seperti skala L
V	150	Bola baja 1/2"	Seperti skala L

Sumber : Avner (1974,p.30)

Nilai kekerasan Rockwell atau Rockwell *Hardness* (HR) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$HR = \frac{k - (h_1 - h_2)}{c} \dots \dots \dots (2-5)$$

Keterangan :

- HR = Nilai kekerasan Rockwell [kg/mm²]
k = Konstanta; intan = 0,2 dan bola baja = 0,6
h₁ = Kedalaman akibat beban mayor (mm)
h₂ = Kedalaman akibat beban minor (mm)
c = Konstanta spesimen

2.5.2.2 Pengujian Metalografi

Metalografi merupakan bidang ilmu mengenai sifat susunan atau struktur mikro (*microstructure*) logam murni, logam paduan, ataupun pada material lainnya (*materiallography*). Bidang ilmu ini digunakan secara luas untuk menentukan ukuran butir, ukuran, bentuk, dan distribusi dari berbagai fasa, serta inklusi pada logam, yang mana memiliki dampak langsung terhadap sifat mekaniknya. Struktur mikro tersebut dapat menunjukkan perlakuan panas yang telah dilakukan pada logam, dan memungkinkan kita untuk memprediksi sifat logam tersebut ketika berada pada kondisi tertentu.

Dalam pengujian metalografi, keberhasilan pengamatan struktur mikro sangat bergantung pada persiapan spesimen uji. Spesimen yang akan diuji harus bersifat rata, bebas dari goresan, dan memiliki permukaan seperti cermin (mengkilap). Pengujian metalografi dilakukan dengan menggunakan mikroskop logam ataupun mikroskop elektron. (Avner, 1974)

Berikut adalah beberapa tahapan dalam persiapan pengujian metalografi.

1. *Sampling* atau pemilihan daerah yang akan diuji. Pada umumnya, daerah yang akan dipilih menyesuaikan dengan lingkup studi yang akan diteliti. Misalnya, apabila ingin meneliti tentang kegagalan, maka pengujian dilakukan dengan membandingkan daerah yang paling dekat dimana kegagalan terjadi dan daerah yang normal.
2. *Mounting*. Proses ini dilakukan apabila material yang akan diuji berukuran kecil atau memiliki bentuk yang sulit untuk diamati dengan mikroskop, seperti kawat, lembaran logam yang berukuran tipis, dan sebagainya. Gambar 2.13 berikut menunjukkan contoh spesimen uji yang telah di *mounting*.



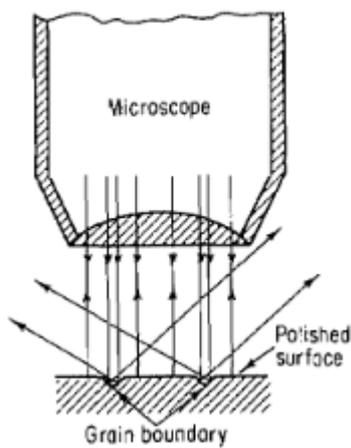
Gambar 2.13 Spesimen uji yang telah di *mounting*

Sumber : Avner (1974,p.15)

3. Perataan dan pemolesan (*polishing*). Proses perataan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas secara manual ataupun dengan menggunakan alat seperti *Centrifugal Sand Paper Machine*. Penggunaan kertas amplas dilakukan

secara berurutan dari yang memiliki kekasaran tertinggi hingga terendah. Sedangkan proses pemolesan dilakukan dengan mengoleskan senyawa alifatik hidrokarbon yang berbentuk pasta untuk membuat permukaan spesimen menjadi mengkilap.

4. *Etching* atau pemberian etsa. Tujuan pemberian reaktan tertentu adalah membuat struktur mikro pada logam dan logam paduan terlihat. Reaktan ini akan bereaksi dengan daerah yang memiliki komposisi kimia tertentu yang sama, sehingga masing – masing fasa dari logam akan terlihat. Reaksi kimia ini juga terjadi pada batas butir yang akan membentuk daerah lembah. Cahaya dari mikroskop yang mengenai daerah lembah ini akan dipantulkan, sehingga batas butir terlihat sebagai garis hitam. Gambar 2.14 berikut menunjukkan skema ilustrasi terlihatnya struktur mikro pada batas butir.



Gambar 2.14 Skema ilustrasi terlihatnya struktur mikro pada batas butir.

Sumber : Avner (1974,p.19)

Adapun ketentuan penggunaan cairan etsa berbeda pada masing-masing material. Berikut adalah tabel 2.7 yang menunjukkan jenis cairan etsa yang digunakan untuk pengujian metalografi.

Tabel 2.7
Jenis Cairan Etsa untuk Pengujian Metalografi

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 1,000 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 Filter and add to nitric acid (sp gr 1.32) 60 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
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)

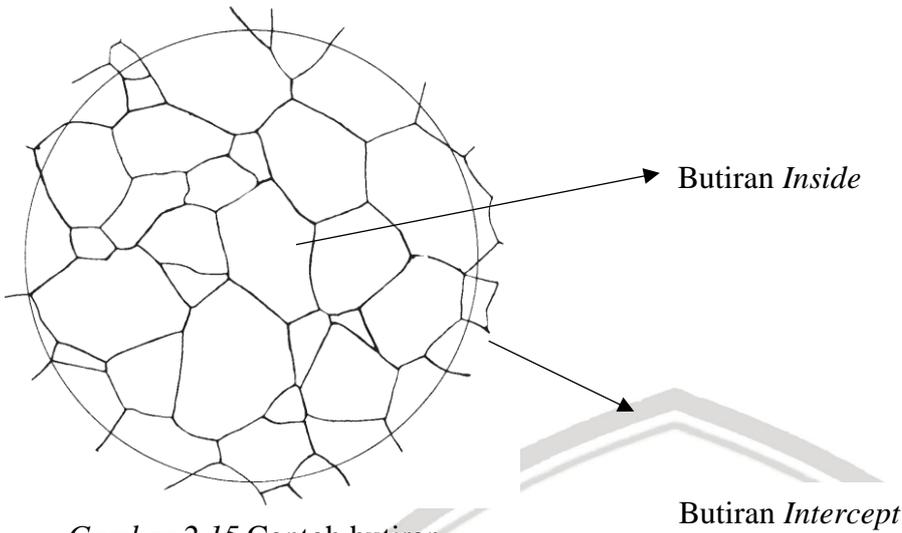
2.5.3 Perhitungan Ukuran Butir

2.5.3.1 Planimetri

Metode ini merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menentukan ukuran butir rata-rata pada material logam, namun dapat juga digunakan pada material non logam yang memiliki struktur mikro yang menyerupai logam dengan menggunakan tabel perbandingan. Karena metode ini dilakukan hanya berdasarkan geometri material, oleh karena itu, metode ini mengabaikan komposisi logam murni ataupun paduan. Metode ini hanya dapat digunakan pada butir yang berjenis planar (2 dimensi pada satu penampang tertentu).

Metode Planimetri dilakukan dengan cara menghitung jumlah butir yang berada pada luasan dengan ukuran 5000 mm² yang diletakkan pada foto mikrostruktur yang dihasilkan dari pengujian metalografi. Untuk mempertahankan tingkat keakurasian, jumlah butir yang berada pada luasan harus berkisar antara 50 hingga 100 butir. Perbesaran foto mikrostruktur dapat menyesuaikan jumlah butir yang berada di dalam luasan. Ukuran butir dihitung dengan menggunakan cara berikut :

1. Menghitung jumlah butiran yang terdapat di dalam luasan, butiran utuh ataupun butiran yang terpotong garis luasan (*intercepted*)



Gambar 2.15 Contoh butiran
 Sumber: ASTM E 112-96 (2004,p.5)

2. Mencari nilai faktor pengali *Jeffries* sesuai dengan perbesaran yang digunakan melalui tabel 2.8 di bawah ini.

Tabel 2.8
 Hubungan Antara Perbesaran dengan Faktor Pengali *Jeffries* untuk Area 5000 mm²

Magnification Used, <i>M</i>	Jeffries' Multiplier, <i>f</i> , to Obtain Grains/mm ²
1	0.0002
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75 ^A	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

^A At 75 diameters magnification, *Jeffries*' multiplier, *f*, becomes unity if the area used is 5625 mm² (a circle of 84.5-mm diameter).

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

3. Menghitung jumlah butiran per satu satuan luas (N_A) menggunakan rumus :

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

Keterangan :

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

f = Faktor pengali *Jeffries*

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

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

4. Menghitung nilai diameter butir (G) dengan menggunakan persamaan diameter butir dari ASTM E 112-96 :

$$G = (3,321928 \log_{10} N_A) - 2,954 \dots\dots\dots (2-7)$$

Keterangan :

G = Nilai diameter butir ASTM

2.6 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka maka dapat diambil hipotesis pada pengecoran aluminium *alloy* Al-Zn dengan menggunakan cetakan permanen dan penyisipan material lain pada bagian alas, penyisipan material yang memiliki konduktivitas termal tinggi akan mempercepat laju pendinginan pada proses solidifikasi. Semakin cepat laju pendinginan maka laju solidifikasi akan meningkat, sehingga butir yang dihasilkan semakin kecil. Ukuran butir akan mempengaruhi nilai kekerasan aluminium *alloy* Al-Zn, dimana semakin kecil ukuran butir maka kekerasannya akan meningkat. Dan begitu pula sebaliknya.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian eksperimental nyata (*true experimental research*). Yang mana ditujukan untuk meneliti kemungkinan hubungan terjadinya sebab akibat antara kondisi perlakuan yang divariasikan, yaitu material tambahan yang disisipkan pada bagian alas cetakan cor, dengan nilai variabel yang dihasilkan yaitu kekerasan dan struktur mikro *pulley* aluminium.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan 1 April – 20 Mei 2018, yang dilakukan di; Laboratorium $\alpha \beta \gamma$ Landungsari, Malang untuk pembuatan spesimen (pengecoran *pulley* aluminium) dan di Laboratorium Pengujian Bahan FT UB untuk pengujian sifat mekanik kekerasan dan pengujian struktur mikro.

3.3 Variabel Penelitian

3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang besarnya ditentukan sebelum penelitian, yang mana menjadi parameter pada penelitian ini. Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Cetakan permanen baja dengan laju pendinginan $0,673 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (media pendinginan pasir yang diletakkan pada bagian alas).
2. Cetakan permanen baja dengan laju pendinginan $0,963 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (media pendinginan baja yang diletakkan pada bagian alas).
3. Cetakan permanen baja dengan laju pendinginan $1,169 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ (media pendinginan tembaga yang diletakkan pada bagian alas).

3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya dipengaruhi oleh variabel bebas dan juga merupakan variabel yang diukur dan diamati dalam penelitian. Variabel terikat pada penelitian ini adalah nilai kekerasan dan struktur mikro *pulley* aluminium.

3.3.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang memiliki nilai konstan. Variabel terkontrol pada penelitian ini adalah :

1. Material yang digunakan aluminium Al-Zn
2. Temperatur peleburan dan penuangan logam adalah 700 °C.
3. Menggunakan cetakan permanen baja.
4. Temperatur *preheating* cetakan cor bagian alas : 250 °C

3.4 Alat dan Bahan

3.4.1 Alat

1. Tungku Peleburan

Tungku ini digunakan untuk meleburkan logam aluminium *alloy* hingga temperatur 700 °C. Dengan spesifikasi sebagai berikut.

- Nama Alat : Tungku Peleburan I 703
- Kapasitas : ± 2 kg
- Tegangan : 220 V

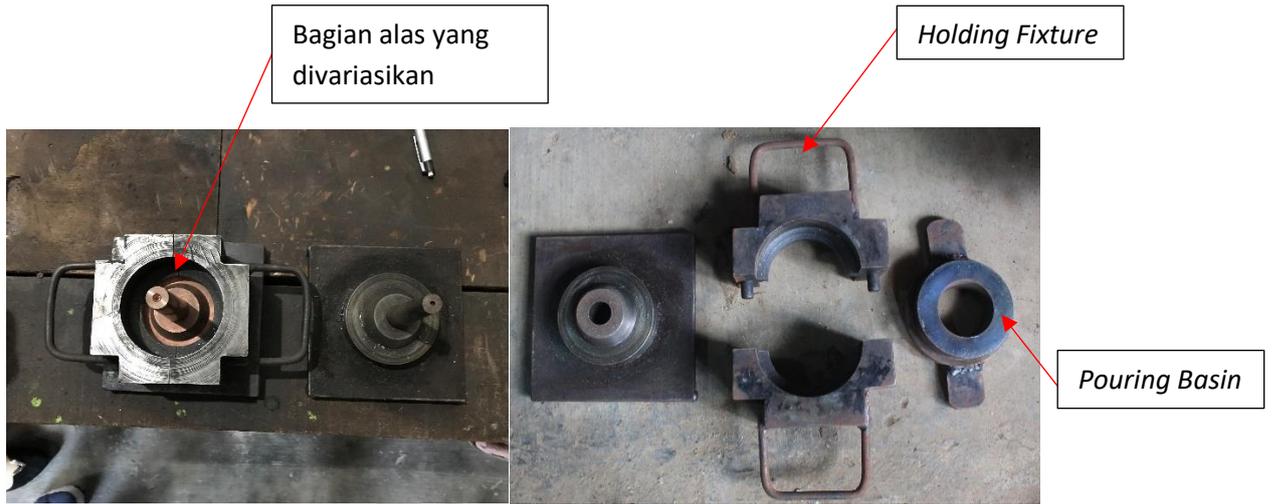


Gambar 3.1 Tungku Peleburan

2. Cetakan Permanen

Cetakan digunakan untuk membuat cetakan *pulley* aluminium dengan memvariasikan penyisipan material pada bagian alas cetakan.

(Dimensi cetakan dan Dimensi material sisip terlampir)



Gambar 3.2 Cetakan permanen

3. Burner

Alat ini digunakan untuk *preheating* cetakan coran hingga temperatur 250 °C



Gambar 3.3 Burner

4. Sarung Tangan

Sarung tangan digunakan untuk proses penuangan logam cair dan melepaskan *pulley* aluminium dari cetakan coran.



Gambar 3.4 Sarung tangan

5. Thermo Gun

Digunakan untuk mengetahui temperatur penuangan logam cair dan temperatur *preheating* cetakan coran pada bagian alas. Dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Tipe : TM 696
- Dimensi : 203 x 197 x 47 m
- *Power Supply* : Baterai DC 1.5 V
- *Temperature Range* : Tipe K (-50 °C – 1300 °C)



Gambar 3.5 Thermo gun

6. Kamera

Digunakan sebagai alat untuk dokumentasi kegiatan selama penelitian.



Gambar 3.6 Kamera

7. Amplas

Digunakan untuk meratakan permukaan hasil coran yang akan diuji kekerasan dan struktur mikro. Dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Ukuran : 20 x 15 cm
- Jenis : P 80, P 100, P 200, P 500, P 800, CC 1000, dan CW 2000



Gambar 3.7 Amplas

8. Kain Flanel

Digunakan untuk menggosok permukaan hasil coran dengan *metal polish* yang akan diuji struktur mikro.



Gambar 3.8 Kain flannel

9. Thermocouple

Digunakan untuk mengetahui laju pendinginan yang terjadi di dalam cetakan coran, diletakkan pada bagian alas cetakan coran.



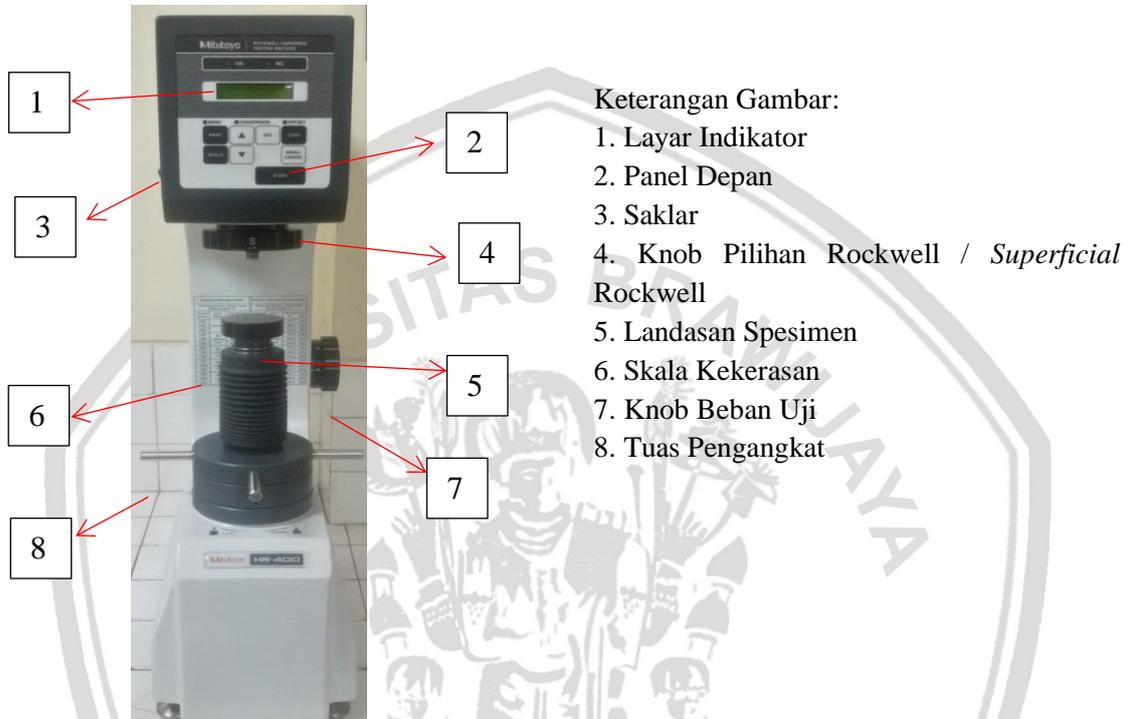
Gambar 3.9 Thermocouple

10. Rockwell *Digital Hardness Tester*

Digunakan untuk mengukur nilai kekerasan *pulley* aluminium paduan.

Dengan spesifikasi sebagai berikut :

- ❖ Merk : Mitutoyo
- ❖ Indentor bola Rockwell : 1/16"
- ❖ Indentor intan : 120°
- ❖ Buatan : Jepang

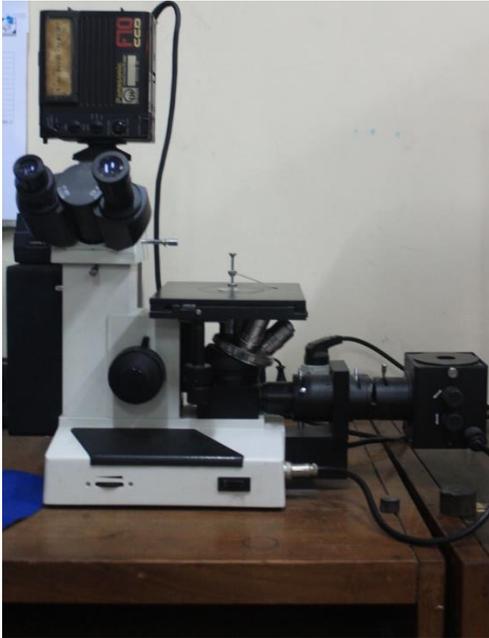


Gambar 3.10 Rockwell *Digital hardness tester*

11. Mikroskop Logam

Digunakan untuk melihat struktur mikro *pulley* aluminium paduan. Dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Merk : Olympus
- Buatan : Jerman
- Pembesaran : 10 – 500x



Gambar 3.11 Mikroskop logam

3.4.2 Bahan

1. Aluminium ingot Al-Zn

Sebagai logam yang akan dileburkan dalam pembuatan *pulley*.



Gambar 3.12 Aluminium Al-Zn

2. *Metal Polish*

Digunakan untuk proses pemolesan logam (pengilapan logam).



Gambar 3.13 Metal polish

3. Etsa

Cairan ini digunakan untuk memperlihatkan struktur mikro pada pengujian metalografi.



Gambar 3.14 Cairan etsa

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Pengecoran *Pulley* Aluminium

1. Proses pembentukan pola cetakan *pulley* aluminium dengan cetakan permanen baja.
2. Nyalakan dapur dan siapkan bahan mentah atau logam yang ingin dileburkan.
3. Panaskan cetakan permanen dengan temperatur 250 °C.
4. Panaskan bagian alas cetakan baja dan tembaga dengan temperatur 250 °C.
5. Pasang alas pada cetakan permanen.
6. Leburkan bahan mentah aluminium di dalam tungku pengecoran dengan suhu 700°C.
7. Lakukan pengecoran dengan menuangkan logam kedalam rongga cetakan.
8. Lakukan pembongkaran cetakan yang sudah dingin.

3.5.2 Prosedur Pengambilan Data Nilai Kekerasan

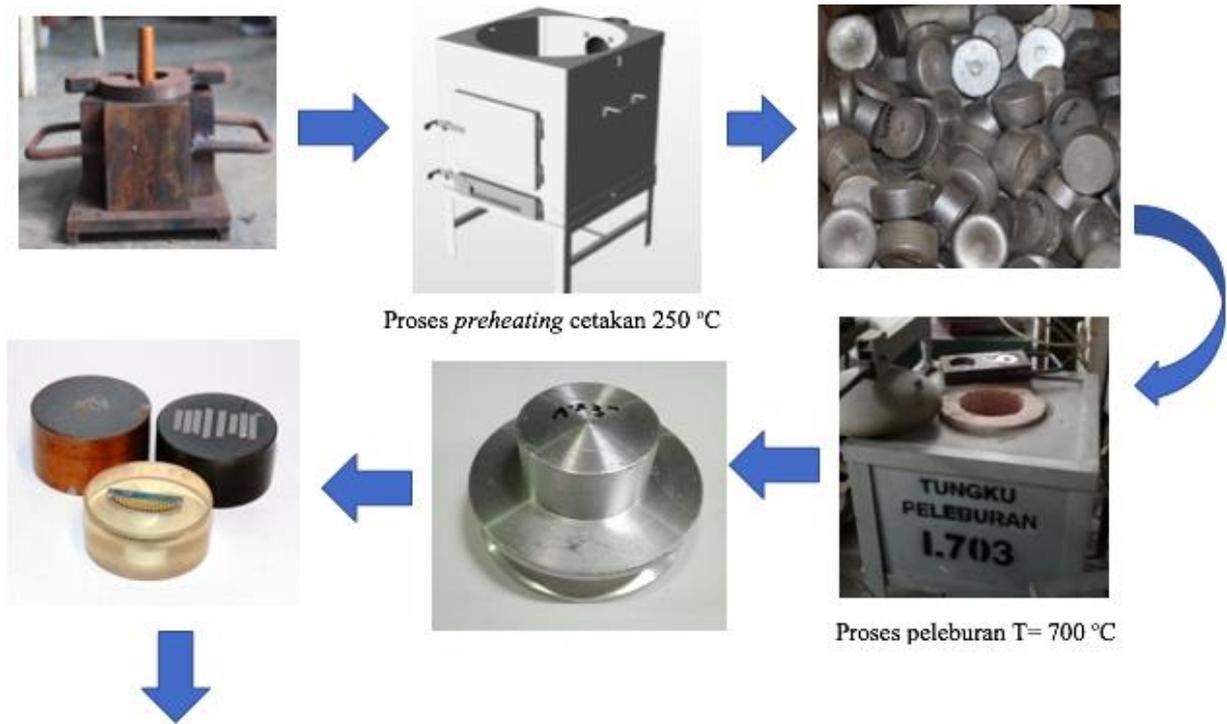
1. Siapkan permukaan benda kerja :
 - a) Ratakan kedua permukaan benda kerja menggunakan kikir dan amplas kasar, sehingga kedua bidang permukaan tersebut rata.
 - b) Haluskan permukaan benda kerja menggunakan amplas.
2. Siapkan perangkat uji kekerasan Rockwell B pada Rockwell *Hardness Tester* :
 - a) Memasang bandul beban (980 N)
 - b) Memasang indeneter intan.
 - c) Memasang benda kerja pada landasan.
 - d) Atur tuas pada posisi *Unloading*.
3. Putar *turn wheel* hingga benda kerja menyentuh pada indentor sampai jarum besar pada skala C dan jarum kecil menunjuk pada titik berwarna merah. Jika terasa berat, jangan dipaksakan tetapi harus diputar balik kemudian cek tuas pembebanan dan diulangi.
4. Dorong tuas pembebanan ke arah *loading* secara perlahan – lahan. Tunggu hingga jarum besar pada skala berhenti dengan sendirinya.
5. Tunggu selama 10 detik dari saat berhentinya jarum, kemudian gerakan tuas ke *unloading* secara perlahan lahan sampai maksimal. Dengan naiknya tuas, jarum ikut berputar searah jarum jam sampai akhirnya berhenti.
6. Baca harga kekerasan HRB pada saat jarum telah berhenti. Bacalah pada skala B yang berwarna merah.

3.5.3 Prosedur Pengambilan Data Pengujian Mirostruktur

1. Permukaan benda yang akan difoto diratakan dengan dan dihaluskan dengan amplas.
2. Permukaan benda dihaluskan dengan *metal polish* dan digosok dengan kain flannel sampai benar – benar mengkilap dan halus.
3. Permukaan benda yang sudah mengkilap dibersihkan dengan alkohol, kemudian ditetesi cairan etsa.
4. Benda diletakkan pada mikroskop logam, kemudian fokus diatur sampai didapatkan gambar yang jelas dengan perbesaran 100 kali.
5. Dilakukan pengambilan gambar secara digital oleh komputer.

Pengolahan data struktur mikro dilakukan dengan metode Planimetri.

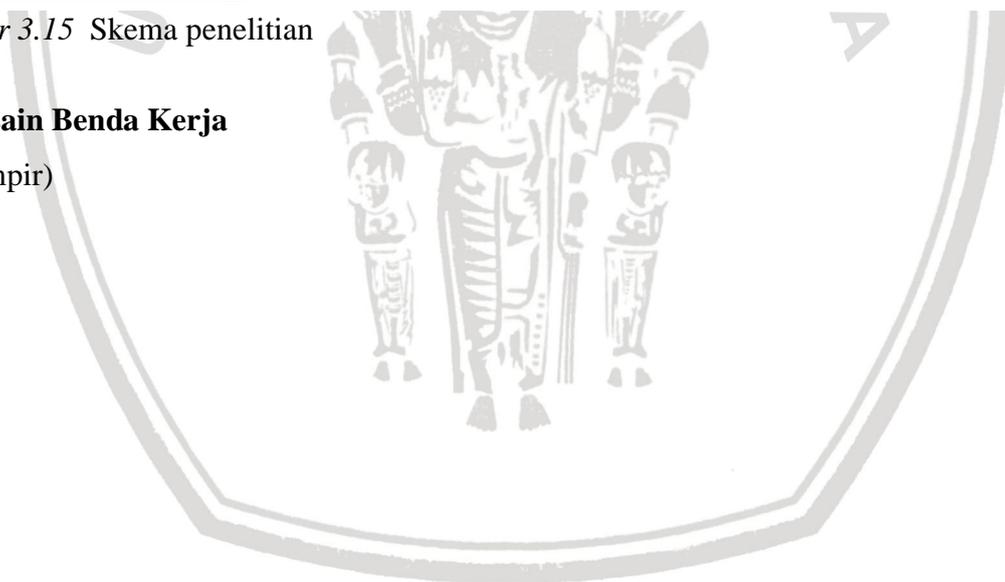
3.6 Skema Penelitian



Gambar 3.15 Skema penelitian

3.7 Desain Benda Kerja

(Terlampir)



3.8 Rancangan Tabel dan Grafik Penelitian

3.8.1 Rancangan Tabel Penelitian

Tabel 3.1.

Rancangan Tabel Data Pengujian Kekerasan

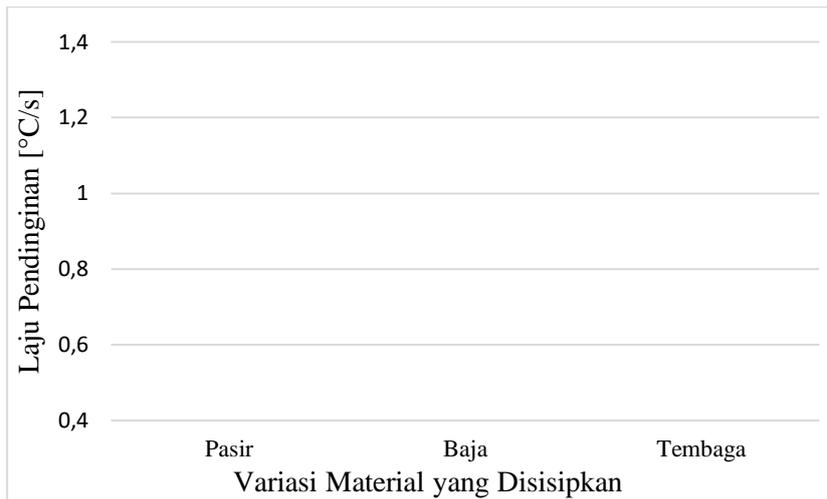
		Bagian A [HRB]			Bagian B [HRB]		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3
PASIR	Pa1,1	Pa2,1	Pa3,1	Pb1,1	Pb2,1	Pb3,1	
	Pa1,2	Pa2,2	Pa3,2	Pb1,2	Pb2,2	Pb3,2	
	Pa1,3	Pa2,3	Pa3,3	Pb1,3	Pb2,3	Pb3,3	
	Pa1,4	Pa2,4	Pa3,4	Pb1,4	Pb2,4	Pb3,4	
	Pa1,5	Pa2,5	Pa3,5	Pb1,5	Pb2,5	Pb3,5	
TEMBAGA	T1	T2	T3	T1	T2	T3	
	Ta1,1	Ta2,1	Ta3,1	Tb1,1	Tb2,1	Tb3,1	
	Ta1,2	Ta2,2	Ta3,2	Tb1,2	Tb2,2	Tb3,2	
	Ta1,3	Ta2,3	Ta3,3	Tb1,3	Tb2,3	Tb3,3	
	Ta1,4	Ta2,4	Ta3,4	Tb1,4	Tb2,4	Tb3,4	
Ta1,5	Ta2,5	Ta3,5	Tb1,5	Tb2,5	Tb3,5		
BAJA	B1	B2	B3	B1	B2	B3	
	Ba1,1	Ba2,1	Ba3,1	Bb1,1	Bb2,1	Bb3,1	
	Ba1,2	Ba2,2	Ba3,2	Bb1,2	Bb2,2	Bb3,2	
	Ba1,3	Ba2,3	Ba3,3	Bb1,3	Bb2,3	Bb3,3	
	Ba1,4	Ba2,4	Ba3,4	Bb1,4	Bb2,4	Bb3,4	
Ba1,5	Ba2,5	Ba3,5	Bb1,5	Bb2,5	Bb3,5		

Tabel 3.2.

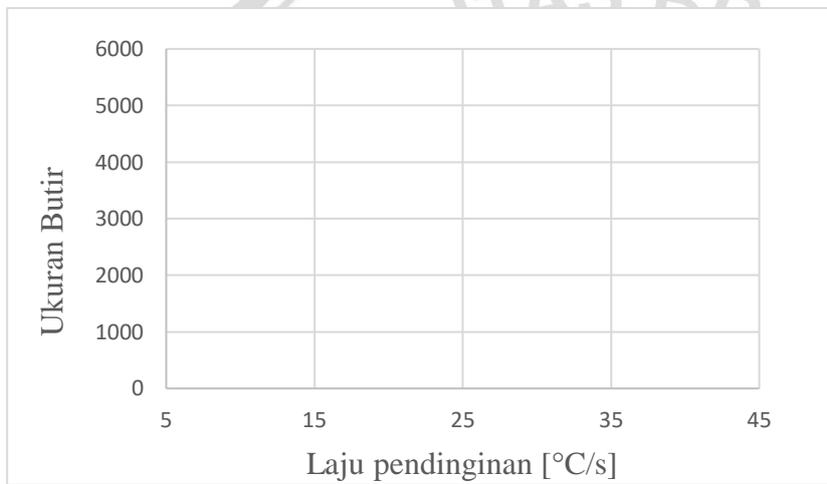
Rancangan Tabel Data Perhitungan Ukuran Butir

Laju Pendinginan	Jumlah Butiran [mm ⁻²]		NA	Ukuran Butir ASTM [G]	Diameter Rata-Rata Butir (μm)
	Utuh	Intercept			
PASIR					
BAJA					
TEMBAGA					

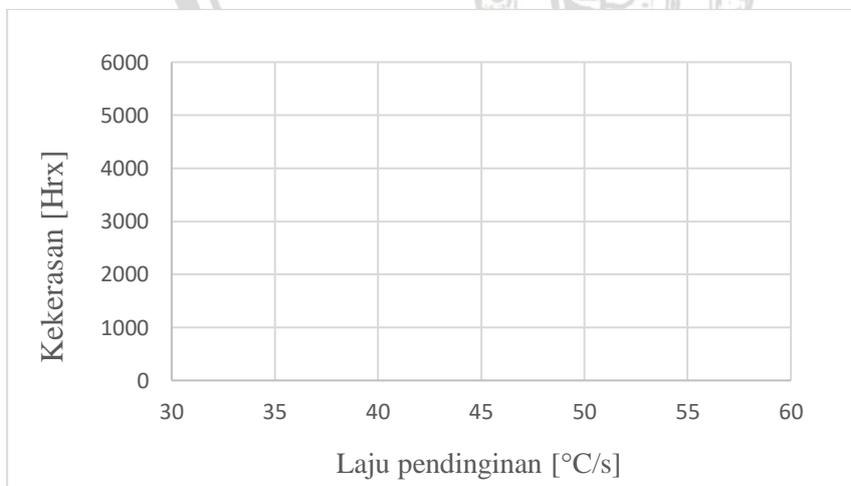
3.8.2 Rancangan Grafik Penelitian



Gambar 3.16 Grafik hubungan material sisipan pada bagian alas terhadap laju pendinginan

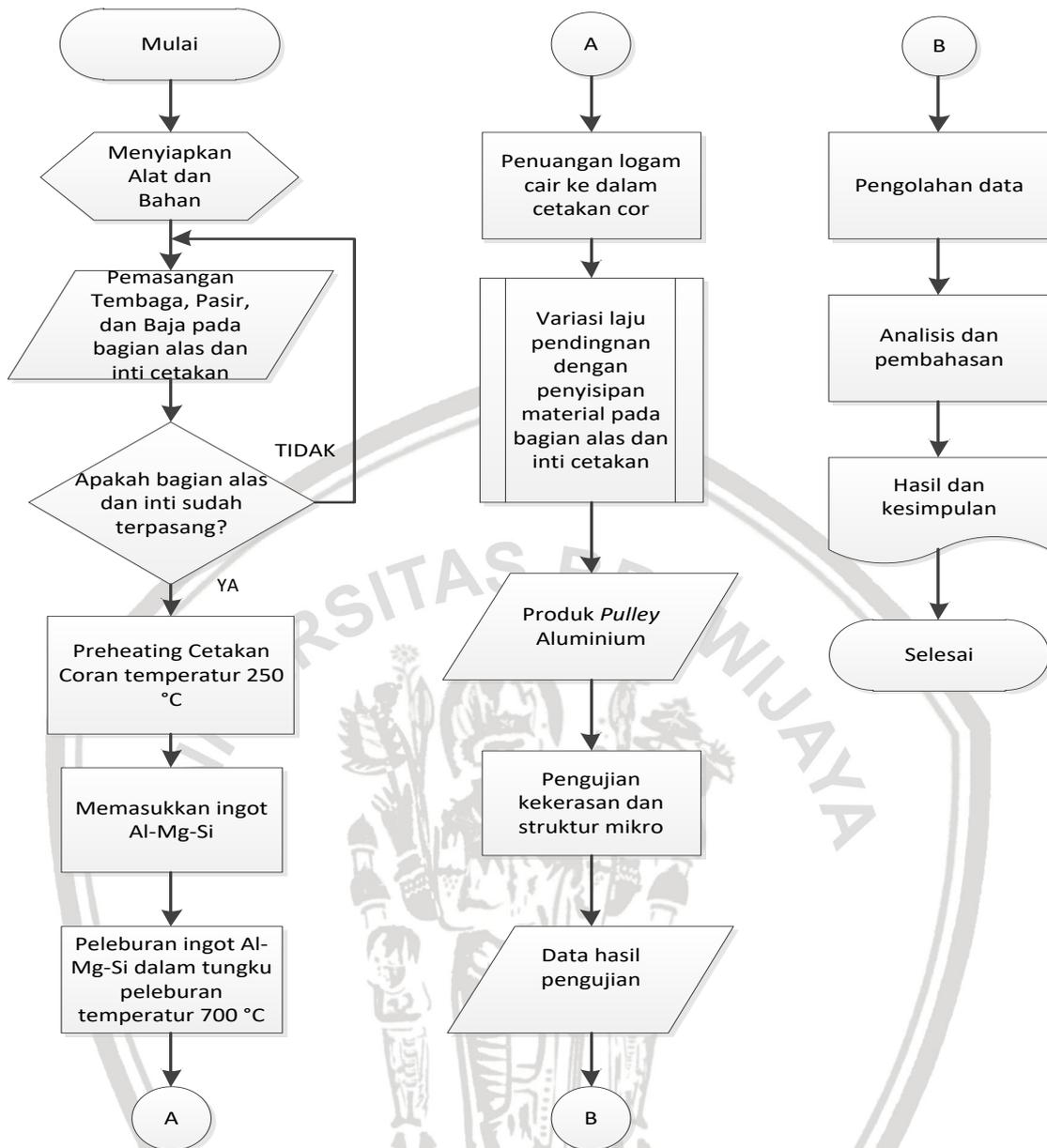


Gambar 3.17 Grafik hubungan laju pendinginan terhadap ukuran butir



Gambar 3.18 Grafik hubungan laju pendinginan terhadap kekerasan

3.9 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.19 Diagram alir penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian

4.1.1 Laju Pendinginan

Nilai laju pendinginan didapatkan dengan mencari selisih temperatur awal dan akhir terjadinya solidifikasi, dan kemudian membaginya dengan waktu yang dibutuhkan sepanjang proses tersebut berlangsung. Adapun perhitungan laju pendinginan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1} = \frac{T}{t} \dots\dots\dots (4-1)$$

dengan :

- T₂ = Temperatur awal terjadinya solidifikasi [°C]
- T₁ = Temperatur akhir terjadinya solidifikasi [°C]
- Δt = Waktu awal dan akhir terjadinya solidifikasi [s]

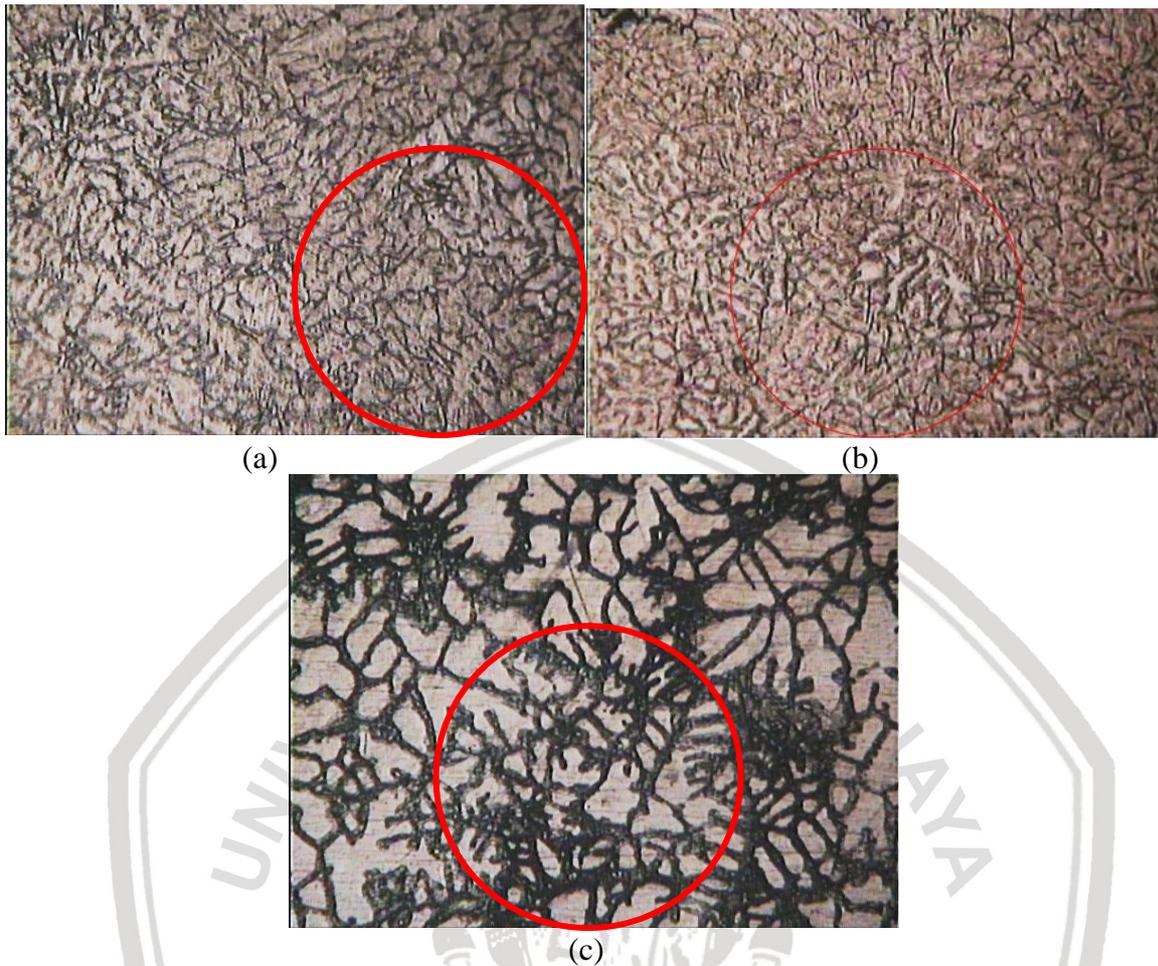
Temperatur awal dan akhir terjadinya solidifikasi dihasilkan melalui perekaman data penurunan temperatur atau *data logger* dan termokopel tipe K. Proses perekaman dilakukan ketika mulai dari proses *preheating* cetakan coran, proses penuangan logam cair ke dalam cetakan coran, hingga proses penurunan temperatur spesimen hingga 100 °C dengan interval 1 detik. Laju pendinginan dengan cetakan permanen baja dengan variasi penyisipan material pasir, baja, dan tembaga pada bagian alas cetakan ditunjukkan pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1.
Laju Pendinginan dengan Variasi Penyisipan Material

Variasi Penyisipan Material	Laju Pendinginan [°C/s]
Pasir	0,673
Baja	0,963
Tembaga	1,169



4.1.2 Hasil Pengujian Mikrostruktur



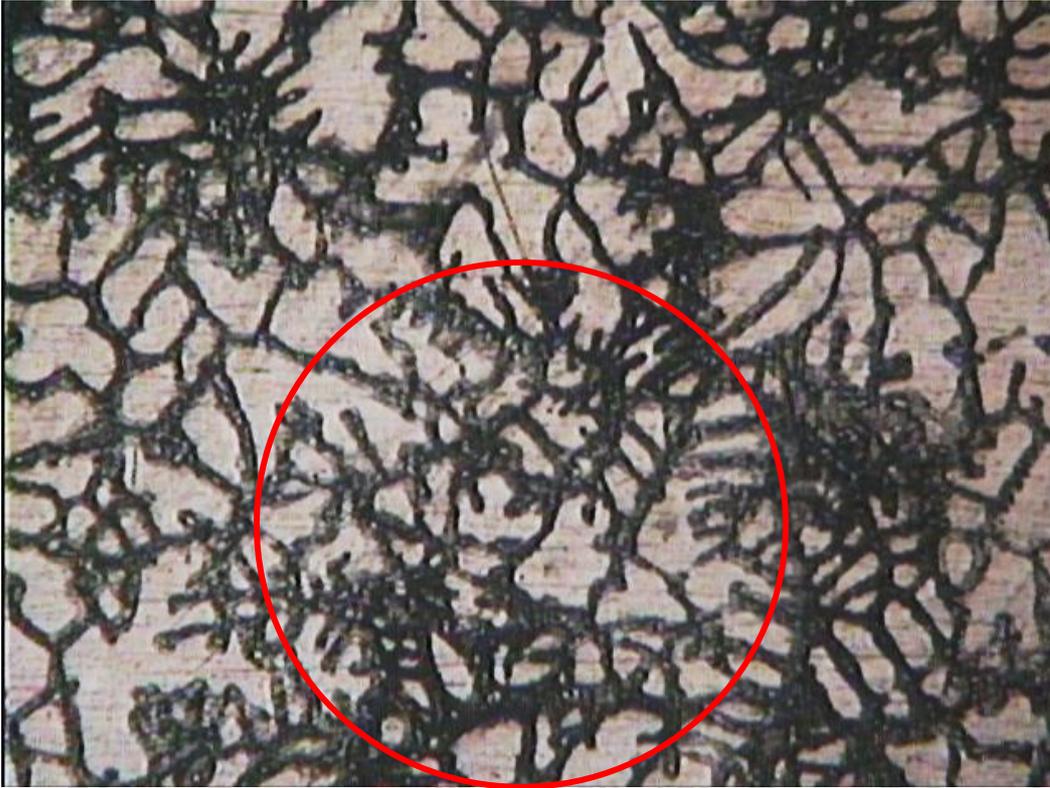
Gambar 4.1 (a) Foto mikrostruktur perbesaran 100x laju pendinginan variasi penyisipan baja 0,963 °C/s (b) variasi penyisipan tembaga 1,169 °C/s (c) variasi penyisipan pasir 0,673 °C/s

Pengolahan data pengujian mikrostruktur dilakukan dengan metode Planimetri untuk mendapatkan ukuran diameter butir rata-rata. Nilai ukuran butir rata-rata spesimen ditunjukkan pada tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2
Ukuran Butir Rata-Rata Spesimen

Laju Pendinginan	Jumlah Butiran [mm ⁻²]		NA	Ukuran Butir ASTM [G]	Diameter Rata-Rata Butir (μm)
	Utuh	Intercept			
PASIR	53	16	122	3,976	90,61
BAJA	50	30	130	4,068	87,85
TEMBAGA	104	30	238	4,94	64,94

Perhitungan ukuran butir sebagai berikut :



Gambar 4.2 Perhitungan jumlah butir

Butiran Utuh : 53 butir

Butiran Terpotong : 16 butir

1. Menghitung nilai jumlah butir pada satuan luas tertentu (N_A)

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

$$N_A = 2 \left(53 + \frac{16}{2} \right)$$

$$N_A = 122 \text{ mm}^{-2}$$

2. Menghitung ukuran butir ASTM (G)

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

$$G = (3,321928 \log_{10} 122) - 2,954$$

$$G = 3,976$$

3. Menghitung ukuran diameter rata-rata (\bar{d})

Perhitungan ukuran diameter rata-rata butir menggunakan tabel hubungan ukuran butir yang terdapat pada ASTM E 112 – 96.

Tabel 4.3.
Hubungan Ukuran Butir

Grain Size No. G	\bar{N}_A Grains/Unit Area		\bar{A} Average Grain Area		\bar{d} Average Diameter		\bar{T} 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	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0	12.50
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3	14.87
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6	17.68
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6	21.02
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0	25.00
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6	29.73
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3	35.36
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8	42.04
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0	50.00
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8	59.46
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1	70.71
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9	84.09
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0	100.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4	118.9
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1	141.4
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9	168.2
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0	200.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2	237.8
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5	282.8
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0	336.4
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5	400.0

Sumber : ASTM E 112 – 96 (2004,p.8)

Setelah mendapatkan nilai ukuran butir ASTM, nilai diameter butir rata-rata didapatkan dengan menggunakan metode interpolasi.

$$\frac{3,5 - 3,976}{4 - 3,5} = \frac{106,8 - d}{89,8 - 106,8}$$

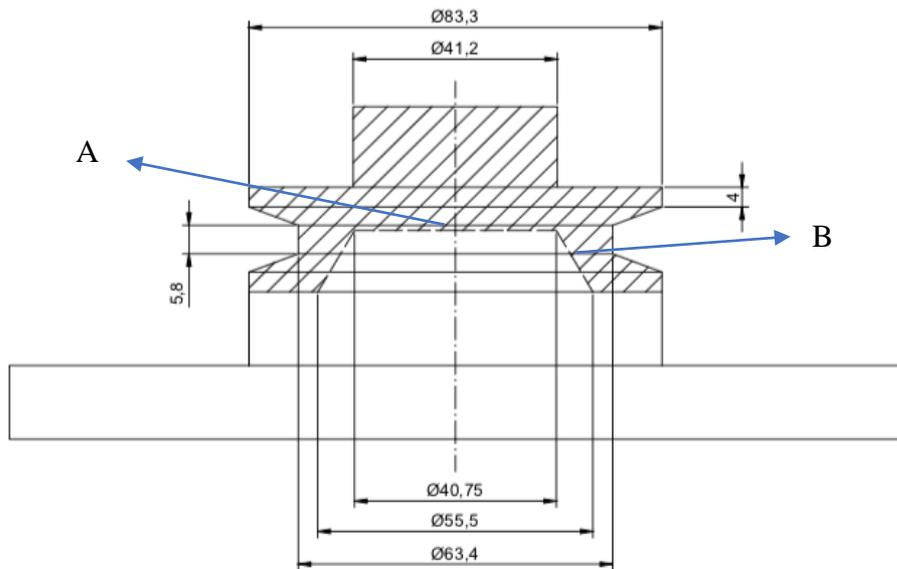
$$\frac{-0,476}{0,5} = \frac{106,8 - d}{-17}$$

$$8,092 = 53,4 - 0,5d$$

$$d = 90,61 \mu m$$

4.1.3 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dari hasil coran dilakukan dengan metode pengujian kekerasan indentasi Rockwell berdasarkan standar ASTM E 18 – 02. Spesimen dengan variasi laju pendinginan dengan media pendingin pasir, baja, dan tembaga yang berjumlah 3 buah diuji kekerasan sebanyak dua daerah. Masing – masing daerah dilakukan pengujian sebanyak 5 titik indentasi dan kemudian diambil rata – ratanya. Daerah pengujian ditunjukkan pada gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Daerah pengujian kekerasan

Adapun nilai kekerasan spesimen ditunjukkan pada tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4.
Nilai Kekerasan Spesimen

	Bagian A [HRB]			Bagian B [HRB]		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
PASIR	25,9	26,60	28,30	32,50	28,30	33,10
	25,80	28,90	26,80	30,30	29,80	36,30
	27,60	31,00	26,10	33,10	25,30	35,20
	26,20	28,50	28,40	31,40	28,40	34,80
	26,20	25,50	27,20	32,80	27,80	36,50
TEMBAGA	T1	T2	T3	T1	T2	T3
	49,90	47,80	49,50	59,40	44,00	55,00
	53,90	48,00	51,70	47,60	46,50	56,00
	53,60	48,40	52,40	57,80	44,90	54,60
	54,50	48,10	52,20	54,10	43,50	55,50
	51,50	46,90	52,50	56,70	47,70	55,90
BAJA	B1	B2	B3	B1	B2	B3
	48,60	39,40	42,70	28,90	44,70	51,90
	48,40	45,40	48,30	26,90	47,10	53,90
	49,30	49,10	50,20	25,90	47,90	55,50
	44,50	48,80	47,30	26,70	48,50	51,70
	47,60	48,20	48,20	30,00	44,60	53,70

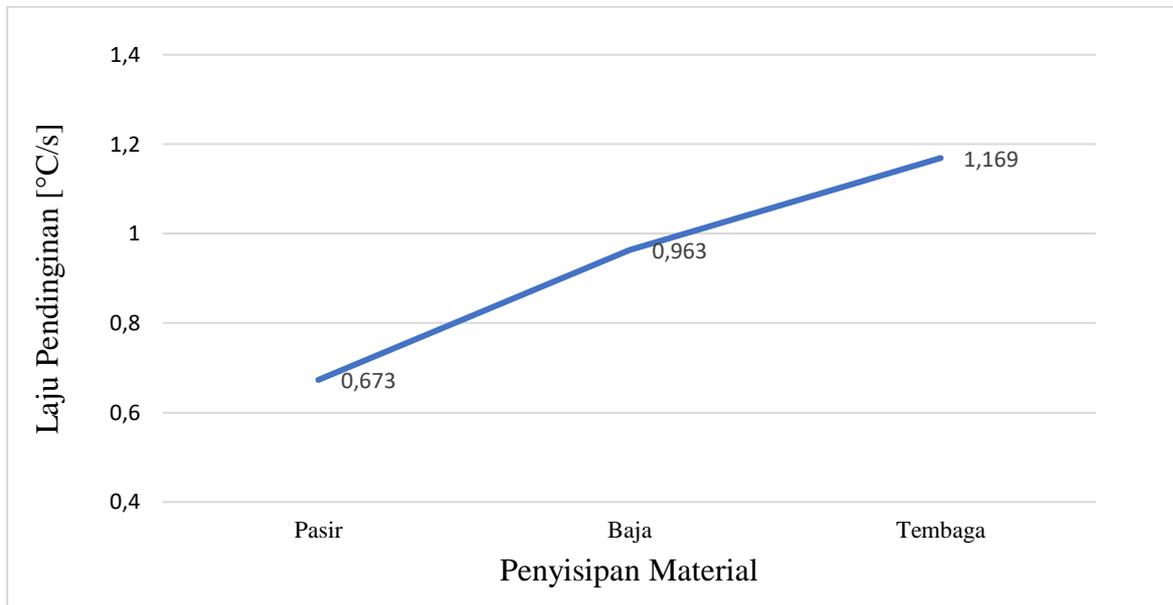
Adapun nilai kekerasan rata – rata spesimen dapat dilihat pada tabel 4.5. berikut.

Tabel 4.5.
Kekerasan Rata-Rata Spesimen

	Kekerasan Rata-Rata [HRB]	
	Bagian A	Bagian B
PASIR	27,242	31,71
BAJA	47,07	42,53
TEMBAGA	50,73	51,95

4.2 Grafik dan Pembahasan

4.2.1 Laju Pendinginan

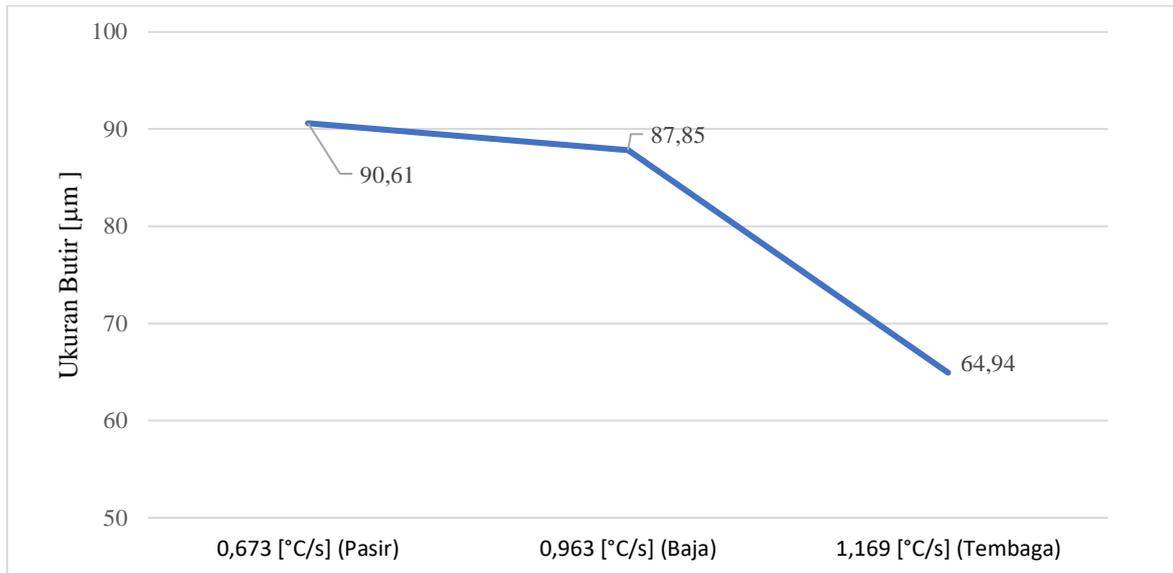


Gambar 4.4 Grafik variasi penyisipan material pada bagian alas terhadap laju pendinginan

Laju pendinginan pada proses pengecoran cetakan permanen baja dengan variasi penyisipan material pasir memiliki nilai terendah yaitu $0,673\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, variasi penyisipan material baja $0,963\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, sedangkan dengan variasi penyisipan material tembaga memiliki nilai tertinggi yaitu $1,169\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. Hal ini disebabkan oleh nilai konduktivitas termal yang dimiliki oleh masing-masing material penyisip, dimana pasir memiliki nilai konduktivitas termal terendah $1,93\text{-}2,90\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, baja $36\text{-}55\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, dan tembaga $401\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$. (Pratiwi, 2012)

Konduktivitas termal merupakan kemampuan suatu material untuk menghantarkan panas, adapun proses perpindahan panas terjadi dari temperatur yang lebih tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Oleh karena itu, ketika proses pendinginan pada pengecoran logam berlangsung, semakin tinggi konduktivitas termal material penyisip pada bagian alas cetakan maka semakin cepat penurunan temperatur yang terjadi, sehingga laju pendinginan yang dihasilkan semakin tinggi.

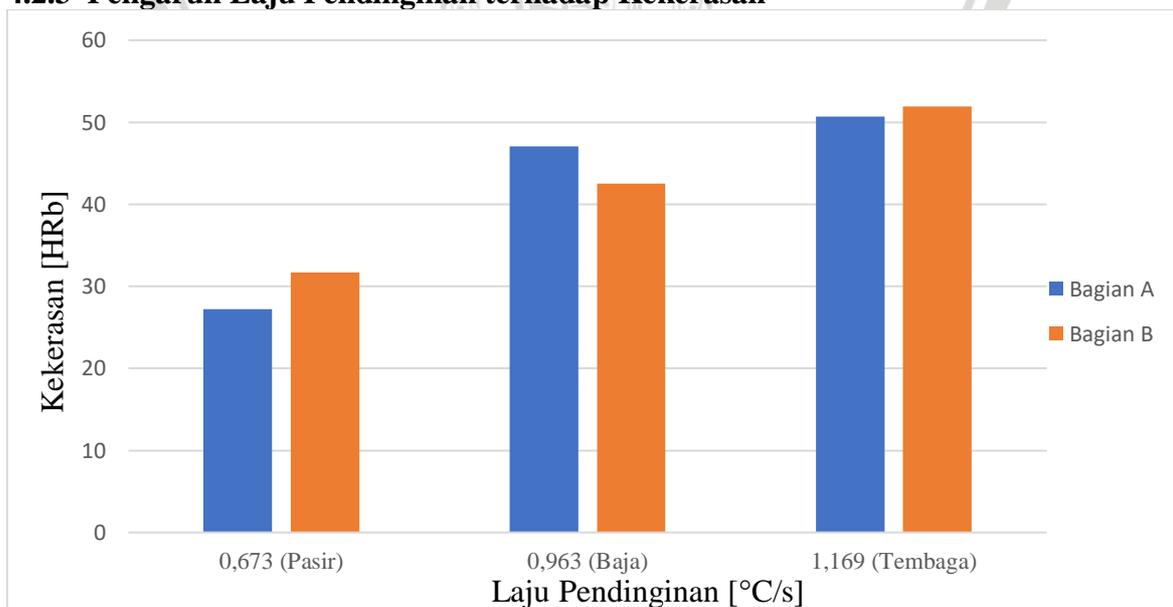
4.2.2 Pengaruh Laju Pendinginan terhadap Ukuran Butir



Gambar 4.5 Grafik pengaruh laju pendinginan terhadap ukuran butir

Pada grafik diatas dapat dilihat bahwa laju pendinginan dengan nilai terendah (0,673 °C/s) dengan variasi penyisipan material pasir pada bagian alas memiliki ukuran butir tertinggi yaitu 90.61 µm. Adapun ukuran butir dengan laju pendinginan variasi penyisipan material baja (0,963 °C/s) 87.85 µm, dan tembaga (1,169 °C/s) 64.94 µm. Hal ini disebabkan oleh pada laju pendinginan tinggi, pertumbuhan butir terhambat oleh waktu solidifikasi yang dibutuhkan sehingga ukuran butir yang terbentuk lebih kecil.

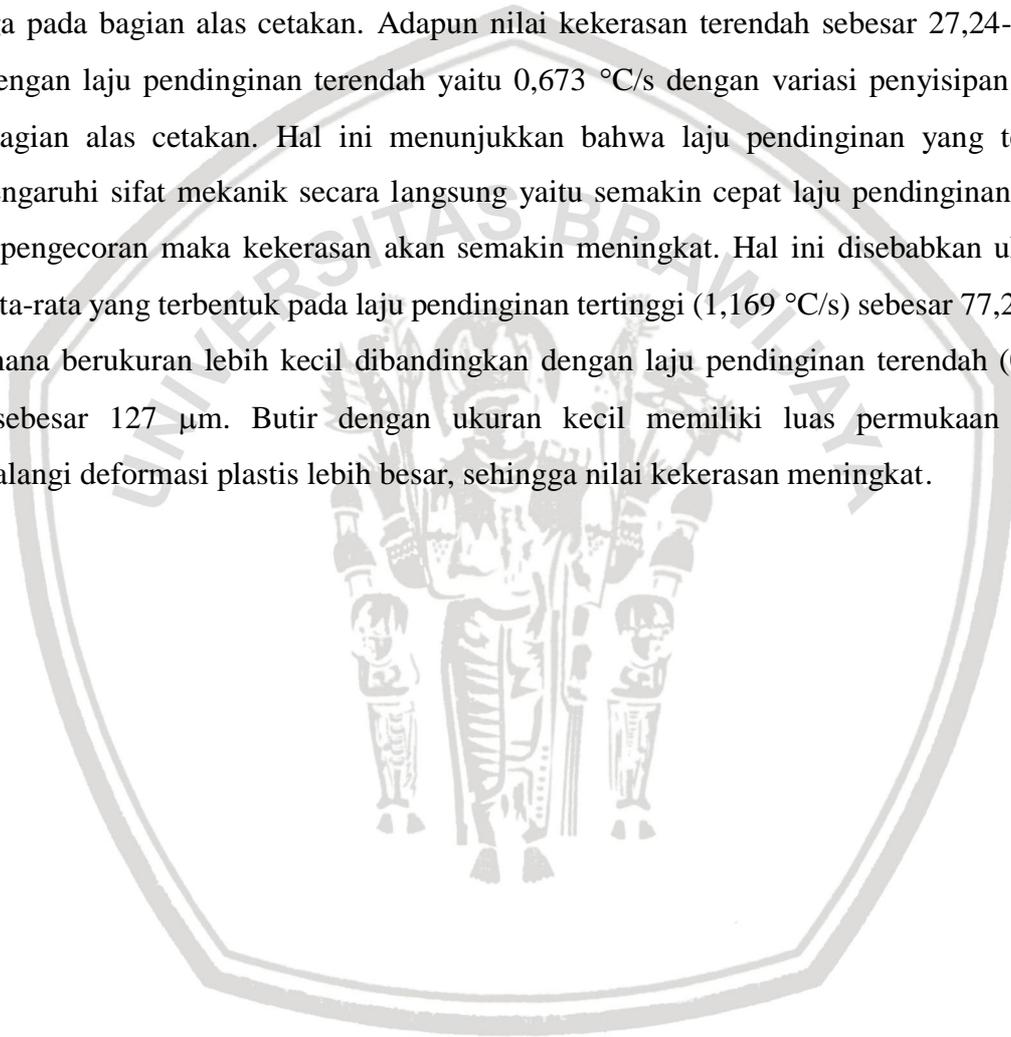
4.2.3 Pengaruh Laju Pendinginan terhadap Kekerasan



Gambar 4.6 Grafik laju pendinginan terhadap nilai kekerasan spesimen

Berdasarkan gambar 4.1 diatas, nilai kekerasan dengan laju pendinginan pasir 0,673 °C/s sebesar 27,24 HRb pada bagian A dan 31,71 HRb pada bagian B, sedangkan laju pendinginan baja 0,963 °C/s sebesar 47,07 HRb pada bagian A dan 42,53 HRb pada bagian B, dan laju pendinginan tembaga 1,169 °C/s sebesar 50,73 HRb pada bagian A dan 51,95 HRb pada bagian B.

Kekerasan rata – rata yang paling tinggi sebesar 50,73-51,95 HRb ditunjukkan oleh spesimen dengan laju pendinginan tertinggi yaitu 1,169 °C/s dengan variasi penyisipan tembaga pada bagian alas cetakan. Adapun nilai kekerasan terendah sebesar 27,24-31,71 HRb dengan laju pendinginan terendah yaitu 0,673 °C/s dengan variasi penyisipan pasir pada bagian alas cetakan. Hal ini menunjukkan bahwa laju pendinginan yang terjadi mempengaruhi sifat mekanik secara langsung yaitu semakin cepat laju pendinginan pada proses pengecoran maka kekerasan akan semakin meningkat. Hal ini disebabkan ukuran butir rata-rata yang terbentuk pada laju pendinginan tertinggi (1,169 °C/s) sebesar 77,27 μm yang mana berukuran lebih kecil dibandingkan dengan laju pendinginan terendah (0,673 °C/s) sebesar 127 μm . Butir dengan ukuran kecil memiliki luas permukaan yang menghalangi deformasi plastis lebih besar, sehingga nilai kekerasan meningkat.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Pengujian kekerasan dengan metode indentasi Rockwell menunjukkan semakin cepat laju pendinginan semakin tinggi nilai kekerasan yang dihasilkan. Adapun pada variasi penyisipan material tembaga pada bagian alas cetakan coran ($1,169^{\circ}\text{C/s}$) menghasilkan kekerasan tertinggi 50,73-51,95 HRb, penyisipan material baja ($0,963^{\circ}\text{C/s}$) menghasilkan kekerasan 42,53-47,07 HRb, dan penyisipan material pasir ($0,673^{\circ}\text{C/s}$) menghasilkan 27,24-31,71 HRb. Hal ini disebabkan oleh ukuran rata-rata butir yang dihasilkan, yaitu semakin besar ukuran butir maka kekerasannya akan menurun.
2. Analisis foto mikrostruktur dilakukan dengan metode Planimetri dengan perbesaran 100x menggunakan mikroskop optik. Analisis ukuran butir menunjukkan semakin cepat laju pendinginan maka ukuran butir yang dihasilkan semakin kecil. Yaitu pada variasi penyisipan material tembaga pada bagian alas cetakan coran ($1,169^{\circ}\text{C/s}$) ukuran butir yang dihasilkan sebesar $64.94\ \mu\text{m}$, variasi penyisipan material baja ($0,963^{\circ}\text{C/s}$) menghasilkan ukuran butir sebesar $87.85\ \mu\text{m}$, dan variasi penyisipan material pasir ($0,673^{\circ}\text{C/s}$) menghasilkan ukuran butir sebesar $90.61\ \mu\text{m}$. Hal ini juga menunjukkan korelasi antara ukuran butir dengan nilai kekerasan dimana semakin kecil ukuran butir maka kekerasannya semakin meningkat.

5.2 Saran

Setelah penelitian ini dilakukan, penulis memiliki beberapa saran agar penelitian ini dapat dikembangkan, diantaranya adalah :

1. Pengukuran temperatur dengan menggunakan termokopel dilakukan pada beberapa titik pada cetakan cor.
2. Perlu penelitian lebih lanjut mengenai pengecoran dengan variasi penyisipan material lain dengan meninjau sifat mekanik lainnya (kekuatan kejut atau kekuatan tarik)
3. Perlu penelitian lebih lanjut mengenai pengecoran dengan variasi penyisipan material lain dengan variasi material non-logam (keramik atau komposit non-logam).

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, M., Nurdin, Abdullah, M., & Mawardi, I. (2012). Pengaruh Media Pendingin Terhadap Beban Impak Material Aluminium Coran. *Skripsi*, Tidak dipublikasikan. Aceh: Politeknik Negeri Lhokseumawe.
- Arifin, A. (2009). Pengaruh Perbedaan Temperatur Cetakan Logam Terhadap Fluiditas dan Struktur Mikro Mg-44% Al. *Jurnal Rekayasa Mesin, Vol. 9 No. 1*.
- ASM International. (1990). *ASM Handbook Vol 2 : Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*.
- ASTM International. (2006). *Standard Test Method for Rockwell Hardness of Metallic Materials (ASTM E18-15)*, United State : ASTM International.
- ASTM International.(2006). *Standard Test Method for Determining Average Grain Size (ASTM E 112-96)*, United State : ASTM International.
- Avner, S. H. (1974). *Introduction to Physical Metallurgy*. New York: McGraw-Hill Book Co.
- Beeley, P. (2001). *Foundry Technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Callister, W. D. (2007). *Materials Science and Engineering*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Campbell, J. (1994). The Fluidity of Molten Metals. *TALAT Lecture 3205*.
- Cengel, Y. A. (2004). *Heat Transfer a Practical Approach 2nd Edition*. New York: McGraw-Hill Education.
- Darmadi, W. (2015). Pengaruh Media Pendinginan Terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan pada Besi Cor. *Skripsi*.
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing 4th Edition*. United States: John Wiley & Sons, Inc.
- Jiang, Y., Ma, Z., Zhang, L., Jia, Y., Fan, C., & Wang, W. (2007). Effect of Cooling Rate on Solidified Microstructure and Mechanical Properties of Aluminium-A356 Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*.
- Kalpakjian, S. (1990). *Manufacturing Engineering and Technology*. Boston: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Murayama, M., Hono, K., Saga, M., & Kikuchi, M. (1998). Atom Probe Studies on the Early Stages of Precipitation in Al-Mg-Si Alloys. *Materials Science and Engineering A250*, 127-132.
- Pollack, H. W. (1981). *Materials Science and Metallurgy*. Virginia: Reston Publishing Company, Inc.

- Pratiwi, D. K. (2012). Hubungan Jenis Cetakan Terhadap Kualitas Produk Cor Aluminium. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XI & Thermofluid IV*.
- Ravi, K., Pillai, R., Amaranathan, K., Pai, B., & Chakraborty, M. (2007). Fluidity of Aluminium Alloys and Composite: A Review. *Journal of Alloys and Compounds*, 456, 201-210.
- Sugita, I. K., Astawa, K., & Priambadi, I. (2015). Pengaruh Variasi Laju Solidifikasi terhadap Struktur Mikro, Sifat Mekanis dan Akustik Perunggu. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTM XIV)*.
- Suprpto, W. (2017). *Teknologi Pengecoran Logam*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Supriyanto. (2009). Analisa Hasil Pengecoran Aluminium dengan Variasi Media Pendinginan. *JANATEKNIKA*, VOL. 11 NO. 2.
- Surdia, P. I., & Chijiwa, P. (1996). *Teknik Pengecoran Logam*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Surdia, P. I., & Saito, P. D. (2013). *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta: PT. Balai Pustaka (Persero).

