PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* TERHADAP KEKERASAN *ALUMINIUM SILICON* DAUR ULANG PADA *SEMIAUTOMATIC POURING SYSTEM*

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK MATERIAL

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh:

MUHAMMAD SYARIF RASYID
NIM. 115060200111022-62

KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN MESIN
MALANG
2015

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LEMBAR PERSETUJUAN

PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* TERHADAP KEKERASAN *ALUMINIUM SILICON* DAUR ULANG PADA *SEMIAUTOMATIC POURING SYSTEM*

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK MATERIAL

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh:

MUHAMMAD SYARIF RASYID
NIM. 115060200111022-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II
Dr.Ir. Wahyono Suprapto, MT.Met	**Khairul Anam, ST., M.SC**
NIP. 19551117 198601 1 001	**NIP. 201310 861127 1 001**

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* TERHADAP KEKERASAN *ALUMINIUM SILICON* DAUR ULANG PADA *SEMIAUTOMATIC POURING SYSTEM*

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK MATERIAL

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh:

MUHAMMAD SYARIF RASYID
NIM. 115060200111022-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 16 Juni 2015

Majelis Penguji

Skripsi I

Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.
NIP. 19591128 198710 1 001

Skripsi II

Ir. Endi Sutikno, MT.
NIP. 19590411 198710 1 001

Skripsi III

Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M. Eng.
NIP. 19750710 199903 1 004

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT
NIP. 19750802 199903 2 002

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan karunianya penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul **"PENGARUH VARIASI *HOLDING TIME* TERHADAP KEKERASAN *ALUMINIUM SILICON* DAUR ULANG PADA *SEMIAUTOMATIC POURING SYSTEM*"** sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi di Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini dapat terselesaikan berkat bantuan, petunjuk dan bimbingan dari berbagai pihak yang telah banyak membantu proses penyelesaian tugas akhir ini, oleh karena itu tak lupa penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr.Eng Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng, selaku ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
2. Bapak Purnami, ST., MT., selaku sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Dr.Ir. Wahyono Suprapto, MT.Met selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Teknik Material Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dan selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan arahan penelitan dan penulisan tugas akhir ini.
4. Bapak Khairul Anam, ST,. M.Sc selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan dan arahan untuk kesempurnaan penelitian dan penulisan tugas akhir ini.
5. Bapak Dr.Eng. Denny Widhiyanuriyawan, ST., MT., selaku dosen pembimbing akademik saya.
6. Kedua orang tua tercinta, bapak Heru Harijanto, ibu Aisjah Helmiati, dan keluarga yang selalu memberi motivasi selama kuliah.
7. Asisten Studio Gambar, Yogi, Veli, Kiki, Hammam, Jihat, Tamtam, Farhan, Fauzan, Lucky, Dimas, dan Arel yang telah banyak memberi masukan dan dukungan terhadap penulisan tugas akhir ini.
8. Tim Apatte-62 Brawijaya, Okky, Fahri, Yosi, Darmo, Aji, Dwipa, Sakti, Hendi, Fauzi, dan Jefri.

9. Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Universitas Brawijaya khususnya KAM11KAZE (angkatan 2011) yang secara langsung atau tidak langsung ikut membantu menyelesaikan skripsi ini.
10. Teman seperjuangan skripsi saya yaitu Darmo, Hendi dan Yossi yang selalu membantu dan memberi masukan pada skripsi ini.
11. Laboratorium αβγ yang telah berkontribusi selama proses penelitian.
12. Semua pihak yang telah membantu terselesainya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca sekaligus dapat menjadi bahan acuan untuk penelitian lebih lanjut.

Malang, Mei 2015

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... **i**
DAFTAR ISI ..... **iii**
DAFTAR TABEL ..... **v**
DAFTAR GAMBAR ..... **vi**
DAFTAR LAMPIRAN ..... **viii**
RINGKASAN ..... **ix**

BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Tujuan Penelitian 3
1.5 Manfaat Penelitian 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **4**
2.1 Penelitian Sebelumnya 4
2.2 Aluminium 4
2.2.1 Sejarah aluminium 5
2.2.2 Sifat-sifat aluminium 5
2.2.3 Penggolongan aluminium 7
2.3 Paduan *Aluminium Silicon* (Al-Si) 9
2.4 Pengecoran Logam 10
2.4.1 Sejarah pengecoran logam 10
2.4.2 Macam-macam proses dan tahapan pengecoran 10
2.5 Proses Peleburan Logam 12
2.5.1 *Holding* 13
2.5.2 Peleburan aluminium dan *silicon* 13
2.5.3 Kelarutan gas pada cairan aluminium dan paduan 14
2.6 Solidifikasi 15
2.7 Difusi 18
2.8 Strukturmikro Paduan Al-Si 21
2.9 Mekanisme Penguatan 22
2.10 *Automatic Pouring System* (APS) 23

2.11 Piston Sebagai Bahan *Recycling* Aluminium 25
2.12 Kesetimbangan Massa 26
2.13 Kekerasan 27
2.14 Hipotesis 30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 31
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian 31
3.2 Variabel Penelitian 31
3.2.1 Variabel bebas 31
3.2.2 Variabel terikat 31
3.2.3 Variabel terkontrol 31
3.3 Persiapan Penelitian 32
3.3.1 Alat 32
3.3.2 Bahan 34
3.4 Skema Penelitian 33
3.5 Prosedur Penelitian 35
3.6 Diagram Alir Penelitian 37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 37
4.1 Data Hasil Pengujian dan Perhitungan 38
4.1.1 Hasil foto mikrostruktur 38
4.1.2 Pengujian kekerasan 41
4.2 Pembahasan 41
BAB V PENUTUP 44
5.1 Kesimpulan 44
5.2 Saran 44
DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

DAFTAR TABEL

NO	JUDUL	HALAMAN
Tabel 2.1	Sifat fisik Aluminium Murni	6
Tabel 2.2	Sifat Mekanik Aluminium	6
Tabel 2.3	Sistem Penamaan Aluminium Tuang	8
Tabel 2.4	Titik Cair dan Temperatur dari Paduan Aluminium	14
Tabel 2.5	Difusivitas Atom	19
Tabel 2.6	Kekerasan Standar Rockwell	29
Tabel 4.1	Ukuran butir tiap spesimen	41
Tabel 4.2	Data Hasil Pengujian Kekerasan	41

DAFTAR GAMBAR

NO JUDUL HALAMAN

Gambar 2.1 Diagram Fasa Al-Si 9
Gambar 2.2 Dua macam bentuk cetakan (a) cetakan terbuka, (b) cetakan tertutup ... 11
Gambar 2.3 Pengaruh temperature terhadap kelarutan hydrogen dalam aluminium .. 15
Gambar 2.4 Ilustrasi skematis pembekuan logam 16
Gambar 2.5 Diagram pendinginan untuk logam murni 16
Gambar 2.6 Ilustrasi skematis dari tiga struktur pengecoran pada solidifikasi logam 17
Gambar 2.7 Diagram pendinginan untuk logam paduan 18
Gambar 2.8 Hubungan suhu terhadap difusivitas 20
Gambar 2.9 Strukturmikro paduan Al-Si 21
Gambar2.10 Batas butir sebagai *barrier* untuk gerakan dislokasi (searah *slip plane*) 22
Gambar 2.11 Jenis sumbat dari peralatan penuangan otomatis dengan pemanasan induksi. 23
Gambar 2.12 Peralatan penuangan otomatis jenis ladel yang dapat dimiringkan 24
Gambar 2.13 Peralatan penuangan otomatis jenis tekanan 24
Gambar 2.14 Alat penuang jenis pompa elektrik 25
Gambar 2.15 Aliran dari cairan logam pada alat penuangan jenis pompa elektromagnet. 25
Gambar 2.16 Piston 26
Gambar 2.17 Proses terjadinya indentasi brinell 28
Gambar 2.18 Prinsip dalam pengujian Rockwell 30
Gambar 3.1 Tungku peleburan 32
Gambar 3.2 Cetakan logam dengan satuan milimeter (mm) 33
Gambar 3.3 *Rockwell Hardness Test* 34
Gambar 3.4 Bahan *recycling* 34
Gambar 3.5 Skema Peneleitian 35
Gambar 3.6 Tampak atas spesimen pengujian kekerasan 36
Gambar 3.7 Diagram alir penelitian 37
Gambar 4.1 Hasil Foto Mikrostruktur Pembesaran 400x 38
Gambar 4.2 foto mikro spesimen A perbesaran 400x sebelum dihitung menggunakan metode planimetri 39

Gambar 4.3 contoh perhitungan butir pada spesimen A perbesaran 400x dengan garis merah sebagai N_{inside} dan kuning sebagai $N_{intercept}$.....40
Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Waktu Holding Terhadap Ukuran Butir dan Kekerasan .42

DAFTAR LAMPIRAN

NO	JUDUL
Lampiran 1	Pengujian komposisi kimia piston
Lampiran 2	Tabel perhitungan ukuran butir ASTM E112
Lampiran 3	Data pengujian kekerasan ingot
Lampiran 4	Data pengujian kekerasan piston

repository.ub.ac.id

RINGKASAN

Muhammad Syarif Rasyid, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2015, Pengaruh Variasi *Holding Time* Terhadap Kekerasan *Aluminium Silicon* Daur Ulang Pada *Semiautomatic Pouring System*, dosen Pembimbing: Wahyono Suprapto dan Khairul Anam.

Aluminium merupakan material yang sering digunakan untuk proses manufaktur seperti pengecoran, permesinan, dan pembentukan. Aluminium dipilih karena memiliki *high strength to weight ratio*, selain itu titik lebur dari aluminium(660^0C) rendah dibandingkan dengan besi atau baja. Aluminium dapat diproduksi menggunakan 2 cara, yaitu dengan mengkonveris bauksit dan proses *recycling*. Untuk mengkonversi bauksit menjadi aluminium perlu melalui beberapa proses, yang pertama adalah proses bayer (mengkonversi bauksit menjadi alumina) dan yang kedua adalah *Hell-Heroult Process* (mengkonversi alumina menjadi aluminium). Aluminium yang didapatkan dari proses bayer dan *Hell-Heroult* disebut aluminium primer. Aluminium primer memiliki kemurnian yang tinggi, hanya saja perlu energi yang besar untuk memproduksinya, yaitu sekitar 15,7 kWh per kilogram aluminium. Cara mengatasi permasalahan energi tersebut adalah dengan proses *recycling*, proses ini melibatkan scrap yang hanya membutuhkan 5% dari energi yang digunakan untuk memproduksi aluminium dari bauksit. Aluminium yang diproduksi dari proses *recycling* disebut aluminium sekunder. Aluminium juga memiliki kekurangan pada sifat mekaniknya, yaitu kekerasannya yang rendah dibandingkan dengan besi dan baja. Salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan penambahan unsur paduan seperti silicon.

Pada penelitian ini menggunakan paduan Al-Si daur ulang yang berasal dari piston bekas dengan variasi waktu holding dalam kondisi cair saat proses peleburan. Waktu holding yang digunakan untuk spesimen A adalah 5 menit, spesimen B 10 menit, spesimen C 15 menit, Spesimen D 20 menit, dan spesimen E 25 menit dengan suhu 660^0C pada masing-masing spesimen. Kemudian dilakukan pengambilan foto mikrostruktur dan pengujian kekerasan pada setiap spesimen.

Dari hasil foto mikrostruktur dapat dilakukan proses perhitungan untuk mengetahui ukuran butir dari masing-masing spesimen. Ukuran butir paling besar ada pada spesimen A dengan waktu holding 5 menit yaitu 62,7 µm, sedangkan yang terkecil ada pada spesimen E dengan waktu holding 25 menit yaitu 44,568 µm. Untuk hasil pengujian kekerasan pada setiap spesimen didapatkan hasil dengan nilai kekerasan tertinggi ada pada spesimen E yaitu 47,3 HRB (86,3 BHN), sedangkan yang memiliki nilai kekerasan paling rendah adalah spesimen A yaitu 42,28 HRB (81,9 BHN). Dari hasil foto mikrostruktur dan uji kekerasan pada penelitian ini dapat diketahui bahwa semakin lama waktu holding maka ukuran butir juga akan semakin mengecil dan persebarannya merata. Semakin lama waktu holding juga dapat meningkatkan nilai kekerasan pada paduan Al-Si daur ulang. Hal ini disebabkan semakin lamanya waktu holding yang digunakan maka memberikan kesempatan pada aluminium dan silikon bisa saling berdifusi dan menyebar semakin dalam.

***Kata Kunci** : Holding, Kekerasan, Paduan Al-Si, recycling aluminium, Automatic Pouring System, HRB*

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada proses pengecoran konvensional, aluminium yang sudah dilebur didalam tungku perlu dipindahkan ke ladel terlebih dahulu kemudian dituangkan ke dalam rongga cetakan pada tempat yang berbeda dari tungku peleburannya. Proses pengecoran konvensional ini memerlukan banyak kontak atau ladel banyak bersentuhan dengan aluminium cair. Sedangkan pada proses pengecoran yang menggunakan *automatic pouring system* (APS) tidak memerlukan banyak kontak dengan aluminium cair atau dapat mengurangi kontak dengan aluminium cair dibandingkan dengan proses pengecoran konvensional karena tempat peleburan dan penuangan terjadi pada tempat yang sama dengan cara membuka sumbat yang terdapat pada tempat peleburan. Selain itu, proses penuangan secara manual juga memiliki banyak kekurangan, yaitu untuk lubang cawan tuang yang kecil memungkinkan logam cair luber dan terbuang keluar dari kup dan dragnya atau luber diatas cetakan yang digunakan dan produsen tidak dapat mengatur kecepatan tuang, sehingga dapat memungkinkan terjadinya pembekuan dini dari logam cair yang dituang apabila kecepatan penuangan terlalu lambat. Selain dapat mengatasi permasalahan-permasalahan tersebut, APS juga dapat meningkatkan produktivitas dari suatu proses pengecoran. Jadi, keuntungan dari APS dapat mengurangi kontak dengan aluminium, dapat mengurangi lintasan saat proses pengecoran, dapat meningkatkan produktivitas, dapat mengurangi kemungkinan cacat yang terbentuk akibat adanya kontak dengan udara, dan dalam aspek keselamatan juga lebih aman. Sedangkan kerugiannya adalah ketika salah satu komponen dari APS rusak atau tidak berfungsi sebagaimana fungsinya maka akan dapat menghambat keseluruhan proses pengecoran yang dilakukan (Paranjape, 2010).

Pada proses peleburan terdapat waktu penahanan (*holding time*). *Holding time* digunakan untuk tujuan menghaluskan butir yang terbentuk. Penghalusan butir merupakan salah satu metode dalam mekanisme penguatan suatu material. Semakin kecil ukuran butir maka jumlah batas butir per unit volume juga akan meningkat, sehingga menyulitkan material tersebut untuk berdeformasi. Selain itu, *holding time* juga berfungsi untuk memastikan bahwa logam yang dilebur sudah mencair secara keseluruhan, sehingga ketika penuangan logam cair kedalam cetakan tidak ada endapan yang dapat menyumbat cetakan sehingga logam cair dapat mengisi seluruh rongga cetakan.

Aluminium merupakan material yang sering digunakan untuk proses manufaktur seperti pengecoran, permesinan, dan pembentukan. Aluminium dipilih karena memiliki *high strength to weight ratio*, selain itu titik lebur dari aluminium(660^0C) rendah dibandingkan dengan besi atau baja. Proses untuk memproduksi aluminium dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan cara mengkonversi bauksit dan proses *recycling* (daur ulang). Bauksit merupakan sumber utama bijih aluminium. Bauksit dikonversi menjadi aluminium oksida (Al_2O_3) dengan menggunakan proses bayer. Untuk mengkonversi alumina menjadi aluminium digunakan *Hell-Heroult Process*. Proses tersebut menggunakan cara elektrolisis larutan alumina cair (950 dan 980 ^{0}C) yang dicampur dalam *cryolite* (Na_3AlF_6) dengan *calcium flouride*. Kemudian aluminium metal akan tenggelam dibawah larutan dan dikeluarkan, biasanya dicor menjadi bentuk blok besar yang biasa disebut dengan *aluminium billets* untuk diproses lebih lanjut. *Hell-Heroult Process* menghasilkan aluminium dengan kemurnian diatas 99%. Untuk pemurnian lebih lanjutnya digunakan proses Hoopess. Proses ini melibatkan elektrolisis aluminium cair dengan sodium, barium, dan *aluminium floride electrolyte*. Sehingga menghasilkan aluminium dengan kemurnian 99,99%. Aluminium yang didapatkan dari bijih bauksit biasa disebut sebagai *primary aluminium*. Kekurangan dari *Hell-Heroult Process* adalah konsumsi energi listrik yang tinggi, yaitu sekitar 15,7 kWh per kilogram aluminium. Cara mengatasi permasalahan energi tersebut adalah dengan proses *recycling*, proses ini melibatkan scrap yang hanya membutuhkan 5% dari energi yang digunakan untuk memproduksi aluminium dari bauksit. Aluminium yang diproduksi dari proses *recycling* disebut aluminium sekunder. Aluminium juga memiliki kekurangan pada sifat mekaniknya, yaitu kekerasannya yang rendah dibandingkan dengan besi dan baja. Salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan penambahan unsur paduan seperti silicon.

Selain dipengaruhi dengan penambahan unsur paduan, sifat mekanik juga dapat dipengaruhi oleh panjang difusi dari unsur paduan tersebut. Panjang difusi: $L^2= 4$ Dt, dengan, L adalah panjang difusi, D adalah koefisien difusi, dan t adalah waktu difusi. Dari rumus tersebut dapat diketahui bahwa panjang difusi sangat dipengaruhi oleh fungsi waktu. Selain itu peningkatan waktu *holding* juga dapat meningkatkan kekuatan ikatan antara aluminium dan unsur paduannya seperti silikon (Muttharasan, 2014). Penjelasan tersebut belum menjelaskan secara langsung hubungan antara waktu holding, difusi, dan kekerasannya. Maka penulis ingin melakukan penelitian tentang pengaruh variasi *holding time* terhadap kekerasan *aluminium silicon* daur ulang pada *Semiautomatic Pouring System*. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan produk dari paduan Al-Si daur ulang yang berkualitas.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun yang menjadi rumusan masalah dalam pengerjaan penelitian ini adalah bagaimana pengaruh *melt holding* terhadap kekerasan paduan Al-Si daur ulang pada proses pengecoran APS?

1.3 Batasan Masalah

Supaya pembahasan dari materi skripsi yang saya ajukan tidak melebar, maka perlu diberikan batasan masalah. Batasan masalah dari skripsi ini adalah:

1. Solidifikasi dianggap seragam
2. Kecepatan penuangan dianggap konstan
3. Sistem paduan yang digunakan adalah paduan Al-Si
4. Mekanisme penguatan yang terjadi adalah penguatan batas butir
5. Difusi unsur paduan
6. Kesetimbangan massa

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Karakterisasi paduan Al-Si daur ulang pada proses pengecoran yang menggunakan APS.
2. Menganalisa sejauh mana pengaruh *melt holding* terhadap kekerasan paduan Al – Si pada proses pengecoran yang menggunakan APS.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian yang saya ajukan adalah :

1. Memberikan pengetahuan baru pada penulis khususnya pada bidang pengecoran logam.
2. Dapat digunakan sebagai studi literatur pada penelitian selanjutnya mengenai APS dan sifat mekanik paduan Al-Si daur ulang.
3. Bisa diterapkan pada industri pengecoran.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Muttharasin, dkk (2014) meneliti efek suhu proses dan waktu *holding* pada komposit Al/SiC. Hasil yang didapatkan dari penelitian tersebut adalah kekuatan ikatan antara aluminium dan silicon semakin meningkat dengan waktu *holding* yang semakin lama. Selain itu peningkatan waktu *holding* juga dapat meningkatkan jarak difusi dari silikon.

Raharjo, dkk (2011) menganalisa pengaruh pengecoran ulang terhadap sifat mekanik paduan aluminium ADC 12. Hasil yang didapatkan dari penelitian tersebut adalah pengecoran ulang menyebabkan penurunan kekerasan pada material ADC 12 dari *Raw material* ke *remelting*, yang semula 95,4 BHN menjadi 73,0 BHN pada temperatur penuangan 700^0C.

Paranjape, dkk (2010) telah meneliti produksi yang dihasilkan oleh *Automatic Pouring System Boosts* yang ada di *Mahindra Hinoday Ind.* Penelitian tersebut menjelaskan tentang system penuangan secara otomatis pada proses pengecoran. Hasil yang disampaikan menunjukkan bahwa peningkatan produksi, kualitas pengecoran yang lebih tinggi, meningkatkan keamanan, mengurangi biaya tenaga kerja dan cepat.

Terashima, dkk(2009) telah meneliti tentang system kontrol pengawasan untuk proses penuangan otomatis logam cair yang mereplikasi keterampilan ahli penuang. Hasil yang disampaikan bahwa dapat meningkatkan produktivitas pabrik, keselamatan pekerja, dan kualitas produk.

2.2 Aluminium

Aluminium adalah logam yang masuk dalam golongan logam *non-ferrous* yang banyak terkandung didalam bumi. Aluminium didapatkan dari hasil pengolahan bauksit. Ada beberapa cara pengolahan bauksit untuk mendapatkan aluminium, beberapa diantaranya adalah proses bayer yang mengolah bauksit menjadi alumina terlebih dahulu dan kemudian diolah lagi untuk mendapatkan aluminium, dan yang kedua dengan cara elektrolisa.

Kemurnian dari aluminium itu sendiri sangat ditentukan oleh proses pengolahannya. Pada umumnya aluminium yang dijual dipasaran tidak mengandung

100% aluminium saja, melainkan terdapat pengotor didalamnya. Adanya pengotor pada aluminium dapat berupa gas yang masuk pada saat proses pengecoran, selain itu pengotor juga bisa timbul karena bahan baku yang kurang berkualitas.

2.2.1 Sejarah aluminium

Pada zaman Yunani dan Romawi kuno sebelum logam ini disebut sebagai "Aluminium", nama awalnya adalah *Alumen, Alum*, yang diambil dari bahasa latin. *Alum* sering digunakan sebagai cairan penutup pori-pori dan bahan penajam pada proses pewarnaan. Pada tahun 1761, de Morveau mengusulkan nama *Alumine* sebagai sebutan untuk basa *Alum*. Pada tahun 1787, Lovoisier mulai mengetahui unsur *Alumine* ini adalah unsur oksida yang belum ditemukan. *Alumine* pertama kali diisolasi pada tahun 1827 oleh ilmuan yang bernama Wohler. Sebelum pada akhirnya nama aluminium pertama kali ditemukan pada tahun 1809, Sir Humpherey Davy mengajukan nama aluminum pada tahun 1807. Penamanan aluminium sama dengan unsur lain yang berakhiran "ium".

Setelah aluminium ditemukan, mulai banyak pengembangan yang dilakukan pada unsur ini. Seperti pada tahun 1825, H. C Oersted pertamakali mereduksi aluminium sebagai logam. Sedangkan pada bidang perindustrian, aluminium mulai masuk pada tahun 1886. Paul Heroul di perancis dan C.M.Hall di Amerika Serikat mendapatkan logam aluminium dengan cara elektrolisa dari garam yang berdifusi dengan bahan baku alumina.

2.2.2 Sifat-sifat aluminium

Aluminium memiliki sifat fisik dan mekanik yang sangat dibutuhkan untuk banyak aplikasi didunia perindustrian. Logam memiliki struktur FCC dengan warna tampilannya yang bervariasi yaitu perak hingga abu-abu yang tergantung pada tingkat kekerasannya. Pada aplikasinya, aluminium berada pada posisi pertama pada golongan logam *non ferrous*. Salah satu alasan logam ini sering digunakan pada bidang perindustrian adalah ketahanan korosi yang baik. Ketahanan korosi ini disebabkan oleh adanya lapisan aluminium oksida (Al_2O_3) yang terbentuk akibat oksidasi aluminium dengan oksigen. Selain dari ketahanan korosinya, sifat fisik aluminium juga banyak berperan dalam aplikasinya. Aluminium memiliki densitas massa 2,7 g/cm^3, sehingga dapat dikatakan bahwa aluminium sebagai logam yang ringan dibandingkan dengan besi dan baja. Secara umum sifat fisik dari aluminium dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1. Sifat fisik Aluminium Murni.

Sifat – Sifat	Kemurnian Al (%)	
	99,996	>99,0
Massa Jenis (20 °C) (g/cm^3)	2,6989	2,71
Titik Cair (°C)	660,2	653 – 657
Panas Jenis (cal/g°C) (100 °C)	0,2226	0,2297
Hantaran Listrik (%)	64,94	59 (dianil)
Tahanan Listrik Koefisien Temperatur (/°C)	0,00429	0,0115
Koefisien Pemuaian (20–100 °C) (/^{0}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 dan Saito, 1999

Aluminium memiliki sifat mampu bentuk, mampu dimesin, dan mampu cor yang baik. Beberapa kemampuan tersebut dipengaruhi oleh sifat mekanikknya. Sama seperti pada sifat fisiknya, sifat makanik aluminium juga bervariasi tergantung pada kemurnian dan jenis perlakuan yang dilakukan. Untuk mengetahui jenis perlakuan yang diberikan maka ditambahkan huruf dibelakan angka kode paduannya. Untuk huruf-huruf yang biasa digunakan adalah F untuk *as fabricated*, O untuk *annealed*, *recrystallized*, H untuk *strain hardened*, W untuk *solution heat treated* atau T untuk *thermally treated*. Secara umum sifat mekanik dari aluminium dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Sifat Mekanik Aluminium

Sifat - Sifat	Kemurnian Al (%)			
	99,996		>99,0	
	Dianil	75% dirol dingin	Dianil	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 dan Saito, 1999

Selain dari jenis perlakuannya, sifat mekanik juga dapat diperbaiki melalui penambahan unsur paduan. Unsur paduan yang sering digunakan adalah Cu, Mn, Si, Mg dan Zn. Penambahan jenis unsur paduan ditentukan berdasarkan kebutuhan sifat mekanik yang diinginkan. Adapun sifat-sifat umum aluminium dan paduannya antara lain sebagai berikut:

1. *High strength to weight ratio*, sifat ini disebabkan oleh struktur FCC yang dimiliki oleh aluminium dan densitas aluminium yang rendah.
2. Tahan terhadap korosi, sifat ini terbentuk karena adanya lapisan Al_2O_3, sehingga aluminium terlindung dari *corrosive agent*.
3. Mudah dibentuk dan memiliki mampu mesin yang baik, dengan adanya sifat ini yang menyebabkan aluminium aplikatif untuk berbagai jenis komponen mesin.
4. Konduktor listrik dan panas yang baik
5. Dapat diproses ulang, kemampuan aluminium untuk didaur ulang dapat mengurangi biaya pembuatan, khususnya saat proses peleburan karena tidak dibutuhkan energi yang terlalu tinggi saat melebur aluminium daur ulang.

2.2.3 Penggolongan aluminium

Aluminium dapat digolongkan berdasarkan komposisi kimianya atau dari jenis unsur paduannya. Penggolongan dari jenis paduan ini menggunakan angka yang sesuai dengan *American Standart Testing Materials* (ASTM). Berikut adalah cara penggolongan aluminium berdasarkan paduannya:

1. Aluminium murni (kandungan aluminium sebesar 99%) 1xxx
2. Copper 2xxx
3. Manganase 3xxx
4. Silicon 4xxx
5. Magnesium 5xxx
6. Magnesium dan silicon 6xxx
7. Zincum 7xxx
8. Elemen – elemen yang lain 8xxx

Dari pengkodean diatas, angka pertama menunjukkan unsur paduan yang ada pada aluminium. Angka kedua menunjukkan sifat khusus yang menandakan perlu perhatian khusus atau tidak. Untuk dua angka terakhir menunjukkan modifikasi dari paduan. Contoh pembacaan dari kode tersebut misalnya ASTM 5056, yang artinya adalah paduan Aluminium – Magnesium tanpa perhatian khusus dan mengalami modifikasi pada paduannya.

Adapun pengkodean yang digunakan untuk aluminium tuang berdasarkan *Aluminium Association of America* (AA). Pengkodean tersebut dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Sistem Penamaan Aluminium Tuang

No. Seri	Komposisi Paduan
1xx.x	Aluminium murni
2xx.x	aluminium – tembaga
3xx.x	aluminium – silicon – magnesium
4xx.x	aluminium – silicon
5xx.x	alumminium – magnesium
7xx.x	aluminium – seng
8xx.x	aluminium – timah

Sumber : ASM International, 2004

Cara pembacaan dari pengkodean aluminium tuang adalah digit pertama dari kode tersebut menandakan jenis paduannya, sedangkan digit kedua dan ketiga menandakan paduan aluminium atau kemurnian dari aluminium tersebut.

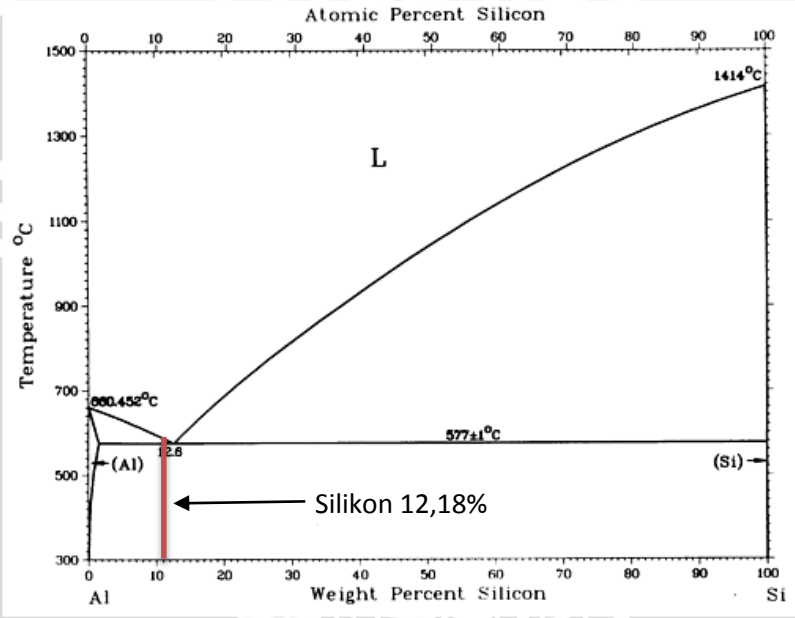
Untuk aplikasi dari masing-masing seri aluminium adalah sebagai berikut:

1. Aluminium murni (kandungan aluminium sebesar 99%) 1xxx
   - *Sheet metal work* : karena aluminium murni memiliki tingkat keuletan yang tinggi.
2. Copper 2xxx
   - Konstruksi keling pada pesawat : karena Al-Cu mampu dikeraskan dengan perlakuan panas.
3. Manganase 3xxx
   - *Storage tanks* : karena Al-Mn memiliki ketahanan korosi yang tinggi.
4. Silicon 4xxx
   - Piston : karena memiliki sifat mampu cor yang baik sehingga cocok untuk bentuk-bentuk benda yang rumit.
5. Magnesium 5xxx
   - Tabung hidrolik : karena memiliki sifat mampu bentuk yang baik.
6. Magnesium dan silicon 6xxx
   - Struktur rangka : karena memiliki kemampuan untuk dibentuk menjadi profil.
7. Zincum 7xxx
   - Struktur rangka pesawat : karena memiliki sifat mampu dikeraskan dengan perlakuan panas

2.3 Paduan *Aluminium Silicon* (Al-Si)

Aluminium dipakai sebagai paduan berbagai logam murni, sebab tidak kehilangan sifat ringan, sifat-sifat mekanisnya, sifat mampu cornya yang dapat diperbaiki dengan menambah unsur-unsur lain. Unsur-unsur paduan itu adalah tembaga, *silicon*, magnesium, mangan, nikel, dan sebagainya yang dapat merubah sifat paduan aluminium.

Penambahan unsur Si pada paduan aluminium dapat menurunkan *spesific grafity*, ketika *spesific gravity* turun, maka densitasnya turun dan membuat fluiditas dari paduan Al-Si meningkat, sehingga dapat dikatakan bahwa paduan Al-Si memiliki sifat mampu cor yang baik. Diagram fasa dari Al-Si ditunjukkan pada gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1 Diagram Fasa Al-Si
Sumber : ASM International, 2004

Gambar dapat dijadikan sebagai acuan atau landasan untuk menganalisa perubahan fasa pada proses pengecoran paduan Al-Si. Kandungan silikon pada diagram fasa Al-Si ini terdiri dari 3 macam, yaitu:

a. *Hipoeutectic*, adalah kondisi dimana kanduang *silicon* kurang dari 12,6% (kaya aluminium) dengan struktur akhir yang terbentuk adalah struktur ferrite.
b. *Eutectic*, adalah kondisi dimana kadungan *silicon* didalam paduan Al-Si sekitar 12,6%.
c. *Hypereutectic*, adalah kondisi dimana kandungan *silicon* lebih dari 12,6% (kaya *silicon*). Karakteristik dari kondisi ini adalah ketahanan aus meningkat, ekspansi termal rendah, dan ketahanan retak panas yang baik.

2.4 Pengecoran Logam

Pengecoran logam adalah salah satu proses manufaktur yang melebur, menuang, dan mendinginkan (solidifikasi). Peleburan pada pengecoran dilakukan untuk mencairkan logam yang pada awalnya memiliki fasa padat. Peleburan dilakukan pada suhu tertentu yang mengacu pada titik lebur dari masing-masing logam. Proses penuangan pada pengecoran dilakukan untuk memindahkan logam cair dari tungku peleburan ke dalam cetakan. Pada saat proses pendinginan logam cair berubah fasa dari cair ke padat dengan bentuk yang berbeda dari padatan material yang belum dilebur.

2.4.1 Sejarah pengecoran logam

Sebelum ditemukannya teknik pengecoran logam, awalnya logam digunakan untuk membuat perhiasan dari emas atau perak, dan kemudian digunakan untuk membuat senjata atau mata bajak. Pembuatan tersebut dilakukan dengan proses penempaan. Namun sekitar 4000 tahun sebelum Masehi orang pada masa itu mulai mengetahui bagaimana mencara mencairkan logam, membuat cetakan, dan penuangannya kedalam cetakan.

Pengecoran perunggu dilakukan pertama di Mesopotamia kira-kira 3000 tahun sebelum Masehi, teknik ini diteruskan ke Asia Tenggara, India, dan Cina. Penerusan ke Cina kira-kira 2.000 tahun sebelum Masehi, dan dalam zaman cina kuno semasa Yin, yaitu kira-kira 1.500-1.000 tahun sebelum Masehi. Pada masa itu tangki-tangki besar yang halus buatannya dibuat dengan jalan pengecoran. Sementara itu teknik pengecoran Mesopotamia diteruskan juga ke Eropa, dan pada tahun 1.500-1.400 sebelum Masehi, barang-barang seperti mata bajak, pedang mata tombak, perhiasan, tangki, dan perhiasan malang dibuat di Spanyol, Swiss, Jerman, Ustria, Norwegia, Denmark, Swedia, Inggris, dan Perancis. (Surdia dan Chijiwa, 1975)

2.4.2 Macam-macam proses dan tahapan pengecoran

Proses pengecoran banyak digunakan didunia industri, hal ini disebabkan oleh banyak keunggulan yang didapat dari proses ini, diantaranya mampu untuk mendapatkan bentuk benda kerja yang rumit, dapat digunakan untuk memadukan dua atau lebih logam dengan tujuan untuk meningkankan kulitas benda hasil coran, dan dapat digunakan untuk produksi masal dengan tingkat ketelitian yang baik. Proses pengecoran juga bermacam-macam, diantaranya:

1. Pengecoran dengan cetakan pasir (*Sand-Mold Casting).*
2. *Shell-Mold Casting.*
3. Pengecoran dengan cetakan semen (*Cement-Mold Casting).*
4. Pengecoran dengan pengaruh gaya sentrifugal *(Centrifugal Casting)*

5. Pengecoran dengan Tekanan Tinggi (*High-Pressure Die Casting).*
6. Pengecoran dengan Tekanan Rendah (*Low- Pressure Die Casting)*
7. Pengecoran dengan cara pola cetakan lilin (*Investment Casting).*

Proses pengecoran logam memiliki beberapa tahap yaitu sebagai berikut :

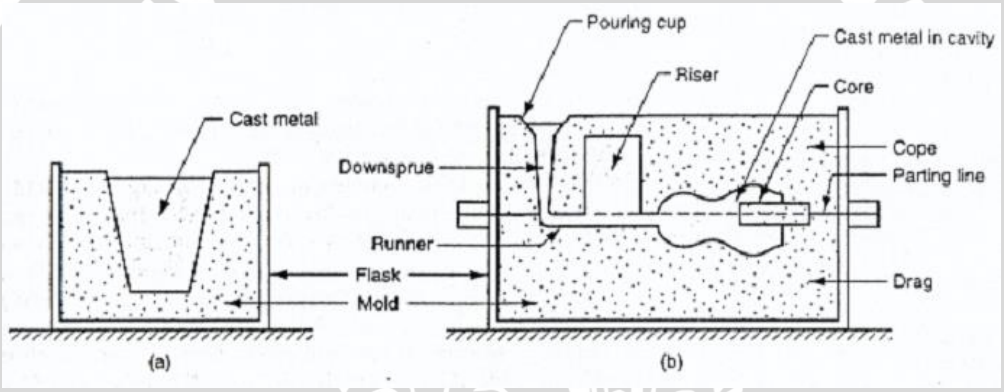
(1) Pembuatan cetakan;

(2) Persiapan dan peleburan logam;

(3) Penuangan logam cair ke dalam cetakan :

a) untuk cetakan terbuka (lihat gambar 2.2.a) logam cair hanya dituang hingga memenuhi rongga yang terbuka,

b) untuk cetakan tertutup (lihat gambar 2.2.b) logam cair dituang hingga memenuhi sistem saluran masuk;



Gambar 2.2 Dua macam bentuk cetakan (a) cetakan terbuka, (b) cetakan tertutup
Sumber: Groover, 2010

(4) Setelah dingin benda cor dilepaskan dari cetakannya;

(5) Untuk beberapa metode pengecoran diperlukan proses pengerjaan lanjut :

- memotong logam yang berlebihan,
- membersihkan permukaan,
- memeriksa produk cor,
- memperbaiki sifat mekanik dengan perlakuan panas (*heat treatment*),
- menyesuaikan ukuran dengan proses pemesinan.

Pada proses pengecoran terdapat dua jenis cetakan, yaitu:

1. Cetakan tidak permanen (*expendable mold*); hanya dapat digunakan satu kali saja. Contohnya : cetakan pasir (*sand casting*), cetakan kulit (*shell mold casting*), cetakan presisi (*precisian casting*).

2. Cetakan permanen (*permanent mold*); dapat digunakan berulang-ulang (biasanya dibuat dari logam).Contoh : *gravity permanent mold casting*, *pressure die casting*, *centrifugal die casting*.

Pada proses pengecoran terdapat proses peleburan logam yang bertujuan untuk merubah fasa logam dari padat ke cair. Proses peleburan ini dilakukan dalam suatu tungku peleburan dengan temperatur lebur mengacu pada titik lebur masing-masing logam. Energi panas yang dibutuhkan pada proses peleburand didalam tungku adalah penjumlah dari :

(1) panas untuk mencapai titik lebur (logam masih dalam keadaan padat),
(2) panas untuk merubah dari padat menjadi cair,
(3) panas untuk mencapai temperatur penuangan yang diinginkan.

Energi panas dapat ditunjukkan dengan persamaan berikut ini :

$$H = Cw\ (T_2 - T_1) \qquad \text{(Groover, 2010)} \qquad (2-1)$$

dengan :

H = Jumlah energi panas (J)
Cw = Panas spesifik (J/kg ^{0}C)
$(T_2 - T_1)$ = Perubahan suhu (^{0}C)

2.5 Proses Peleburan Logam

Peleburan logam adalah proses mecairkan logam pada temperatur tertentu yang mengacu pada titik lebur dari masing-masing logam dengan menggunakan energi panas yang di hasilkan oleh tungku peleburan. Proses peleburan juga dapat mempengaruhi kualitas hasil coran karena pada saat peleburan memungkinkan gas hidrogen terlarut didalam logam cair dan dapat menyebabkan cacat coran. Pada proses peleburan juga sering ditambahkan fluks.

Soleh (2006) fluks adalah bahan yang digunakan untuk membersihkan atau mengikat kotoran yang terjadi pada saat proses peleburan. Penambahan fluks sendiri dinamakan *fluxing*, pemberian fluyks sendiri dilakukan setelah logam mencair. Selama pencairan logam, permukaan harus ditutup dengan fluks dan cairan diaduk dalam jangka waktu tertentu untuk menjaga unsur-unsur paduan. Menurut Tata Surdia dan Kenji Chijiwa (1976:171) bahwa "penggunaan fluks kering 1% sampai 3% dapat mengurangi gas dan mencegah gelembung udara serta lubang jarum, disamping itu juga memperbaiki sifat-sifat mekanisnya".

2.5.1 *Holding*

Holding adalah bagian dari siklus termal yang mana suhu objek dijaga konstan. Didalam proses *holding* terdapat istilah *holding temperature* dan *holding time*. *Holding temperature* adalah suhu konstan dimana objek dipertahankan. Sedangkan *holding time* adalah lama waktu dimana suhu objek tetap dipertahankan konstan.

Zakwan (2009) telah mempelajari pengaruh waktu penahanan terhadap partikel aluminium cair siap cetak pada proses perlakuan logam aluminium cair di dapur penampung PT.Indonesia Asahan Aluminium. Hasil dari penelitian tersebut menyatakan bahwa proses penahanan atau *holding* dilakukan untuk memberi kesempatan inklusi untuk mengapung ke permukaan dan gas-gas terlepas ke udara bebas. *sodium* yang mengakibatkan kerapuhan pada temperatur tinggi dapat dengan mudah menguap pada saat penahanan dan juga untuk menurunkan temperatur hingga mencapai temperatur pencetakan (casting)$\geq 720^0$C.

Istilah *holding* juga terdapat pada salah satu tahap dari proses *age hardening*, yaitu pada tahap perlakuan panas pelarutan (*solution heat treatment*). *Solution heat tratment* adalah pemanasan logam aluminium dalam dapur pemanas dengan temperatur kurang dari 548^0C dan dilakukan penahanan atau *holding time* sesuai dengan jenis dan ukuran benda kerja, pada tahap ini terjadi fasa-fasa yang ada, menjadi larutan padat. Tujuannya dari proses ini yaitu untuk mendapatkan larutan padat yang mendekati homogen (Paryono, 2011).

Xu-liang (2010) pada penelitiannya yang berjudul *"Effect of Al5Ti1B Master Alloy on Microstructures and properties of AZ61 Alloys"* menyatakan bahwa pada variasi waktu holding 5, 10, 20, dan 30, ukuran butir dari paduan tersebut terlihat pada foto mikrostruktur semakin mengecil. Dari hasil tersebut terlihat bahwa waktu penahanan dapat mengurangi ukuran butir pada paduan AZ61 dengan penambahan paduan 0,5%Al5TilB setelah *solution treatment*.

2.5.2 Peleburan aluminium dan *silicon*

Pada proses peleburan untuk mendapatkan logam cair pasti akan dilakukan dengan menggunakan suatu tungku peleburan di mana material bahan baku dan jenis tungku yang digunakan harus disesuaikan dengan material yang akan dilebur. Jenis tungku peleburan ada berbagai macam, anatara lain diklarifikasikan dari jenis energinya atau kapasitasnya.

Paduan aluminium dan paduan ringan lainnya biasanya dilebur dengan menggunakan tungku peleburan jenis krusibel dan tungku listrik. Tungku krusibel

mempunyai konstruksi paling sederhana, fleksibel dan serba guna untuk untuk peleburan skala kecil dan sedang. Bahan bakar tungku krusibel dapat berupa minyak, induksi listrik frekuensi rendah, dan juga dapat dioperasikan menggunakan bahan bakar gas. Sehingga besar kecilnya energy yang dibutuhkan saat proses peleburan sangat diperhatikan.

Namun aspek yang paling penting dalam peleburan aluminium dan paduannya adalah penentuan temperatur peleburan serta waktu peleburan itu sendiri. Karena temperatur dan waktu peleburan sangat mempengaruhi kualitas produk hasil peleburan, khususnya untuk paduan Al-Si dimana keduanya memiliki titik lebur yang jauh berbeda yaitu Al 660 °C dan Si 1414 °C. Berikut ini adalah contoh dari beberapa titik cair dan temperatur dari paduan aluminium seperti tabel 2.4 berikut ini:

Tabel 2.4 Titik Cair dan Temperatur dari Paduan Aluminium

Paduan dan Komposisi	**Temperatur Mulai cair (°C)**	**Temperatur Akhir cair (°C)**	**Temperatur Penuangan (°C)**
Al – 4.5 Cu	521	644	700-780
Al–4Cu–3Si	521	627	700-780
Al–4.5Cu–5Si	521	613	700-780
Al–12Si	574	582	670-750
Al–9.5Si–0.5Mg	557	596	670-740
Al–3.5Cu–8.5Si	538	593	700-780
Al–7Si–0.3Mg	557	613	700-780
Al–4Cu–1.5Mg–2Ni	532	635	700-760
Al–3.8Mg	599	641	700-760
Al–10Mg	499	604	700-760
Al–12Si–0.8Cu–1.7Mg–2.5Ni	538	566	670-740
Al–9Si–3.5Cu–0.8Mg–0.8Ni	520	582	670-740

Sumber :Surdia dan Chijiwa, 1975

2.5.3 Kelarutan gas pada cairan aluminium dan paduan

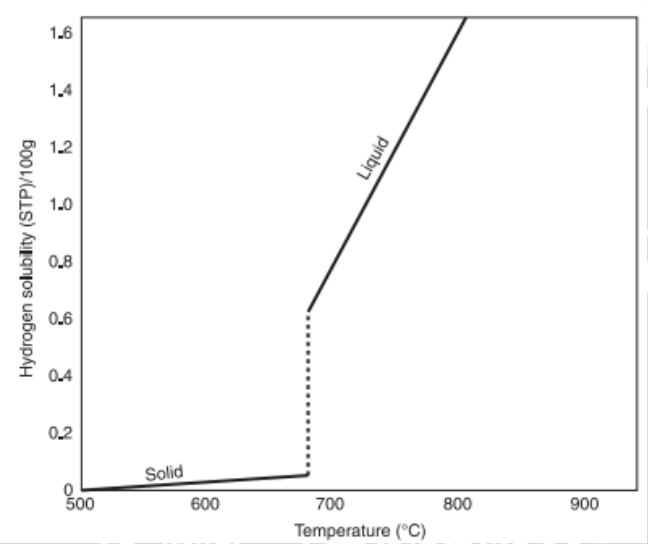
Hidrogen adalah satu-satunya gas yang dapat larut pada aluminium dan paduannya. Hal ini dikarenakan afinitas kelarutan hidrogen pada rentang temperatu yang tinggi sesuai persamaan reaksi:

$3H_2O + 2\ Al \rightarrow 6H + Al_2O_3$

Hidrogen larut secara atomik pada cairan aluminium. Selama proses pendinginan dan pembekuan, hidrogen berlebih yang terdapat pada aluminium cair akan mengendap

membentuk molekul dan akhirnya mengakibatkan pembentukan porositas, baik porositas primer maupun sekunder. (Febrian, 2008).

Salah satu faktor yang menyebabkan terjadinya cacat coran khususnya porositas adalah kelarutan gas hidrogen didalam aluminium. Sumber hidrogen yang terlarut pada Aluminium adalah uap air, uap panas, atau hasil dari reaksi kimia. Sumber lain dari hidrogen yang terlarut dalam aluminium berasal dari atmosfer.



Gambar 2.3 Pengaruh temperatur terhadap kelarutan hydrogen dalam aluminium
Sumber: Lumley, 2011

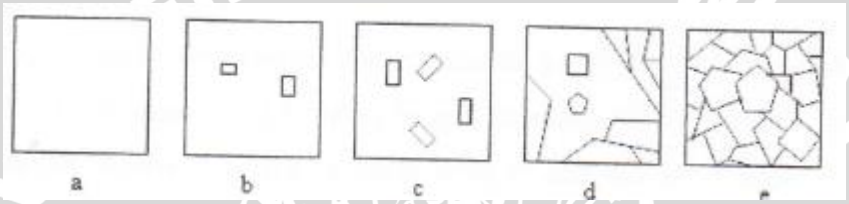
Dari gambar 2.3, dapat dilihat bahwa kelarutan gas hidrogen terus meningkat seiring dengan peningkatan temperatur lebur. Khususnya pada temperatur diatas 710^0C, kelarutan gas hidrogen pada aluminium akan semakin tinggi karena pada suhu tersebut lapisan Al_2O_3 yang ada pada aluminium pecah dan menyebabkan hidrogen bisa masuk ke dalam aluminium saat proses peleburan.

Untuk mengurangi kelarutan gas hidrogen pada aluminium dapat ditambahkan unsur paduan seperti Si, Zn, Cu, dan Mn. Selain unsur yang mengurangi, ada juga unsur yang dapat meningkatkan kelarutan gas hidrogen pada aluminium, yaitu Mg, Fe, Ni, dan Li.

2.6 Solidifikasi

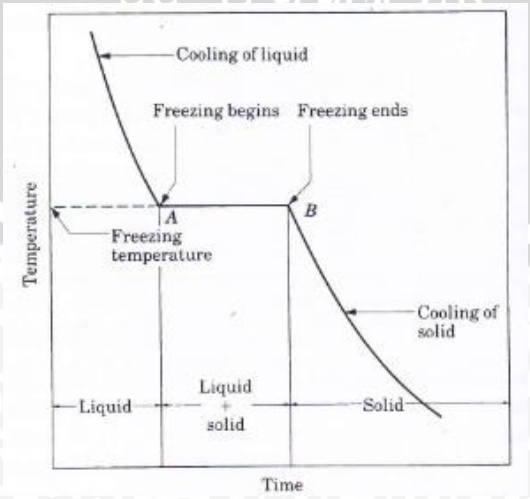
Setelah logam cair dituangkan pada cetakan, langkah selanjutnya adalah solidifikasi yang mendinginkan dengan temperatur lingkungan. Solidifikasi mempengaruhi ukuran, bentuk, dan keseragaman dari butir yang terbentuk pada hasil coran, yang mana hal-hal tersebut juga mempengaruhi sifat mekaniknya.

Semua logam pada proses pembekuan membentuk kristal, yaitu susunan teratur atom-atom yang berulang dalam suatu ruang. Atom logam pada kondisi cair berada dalam berada dalam kondisi tidak teratur, ketika mulai membeku atom-atom mulai menyusun diri dalam suatu ruang. Atom yang mula-mulai menyusun diri adalah atom yang lebih dahulu stabil. Susunan awal atom disebut inti dan proses pembentukan inti disebut pengintian (*crystallization*). Setelah terbentuk inti, atom-atom lain akan mengikuti inti-inti tersebut sehingga seolah-olah inti berkembang dan memiliki cabang-cabang yang disebut dendrit. Dendrit akan terus berkembang dan bersinggungan dengan dendrit yang lain sehingga terbentuk batas butir (*grain boundary*), sedangkan kristal yang dibatasi batas butir disebut butir. (Franciska, 2015)



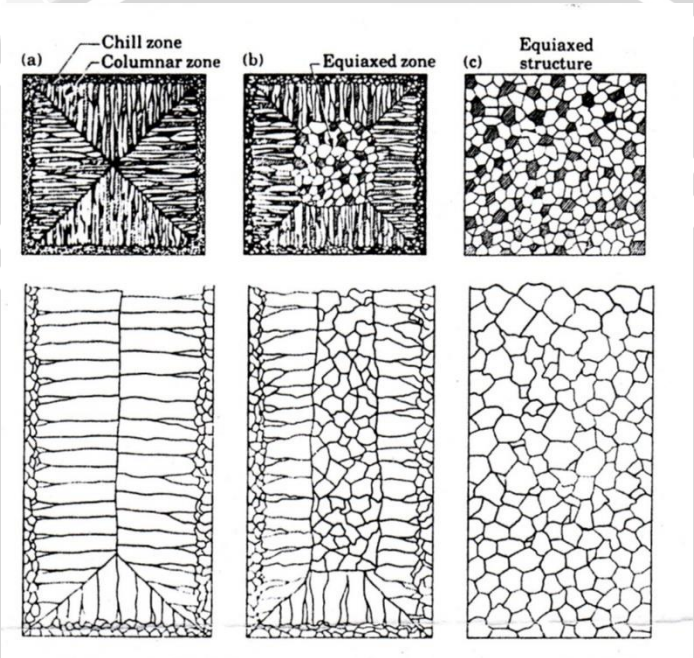
Gambar 2.4 Ilustrasi skematis pembekuan logam
Sumber: Surdia dan Chijiwa, 1996

Untuk logam murni solidifikasinya terjadi pada temperatur konstan, hal ini dikarenakan logam murni memiliki titik lebur dan titik beku yang sudah diketahui. Aluminium murni contohnya, mulai membeku pada suhu 660^0C (1220^0F), besi 1537^0C (2798^0F), dan tungsten pada 3410^0C (6170^0F). Untuk proses solidifikasinya dapat dilihat pada gambar 2.5 dibawah ini



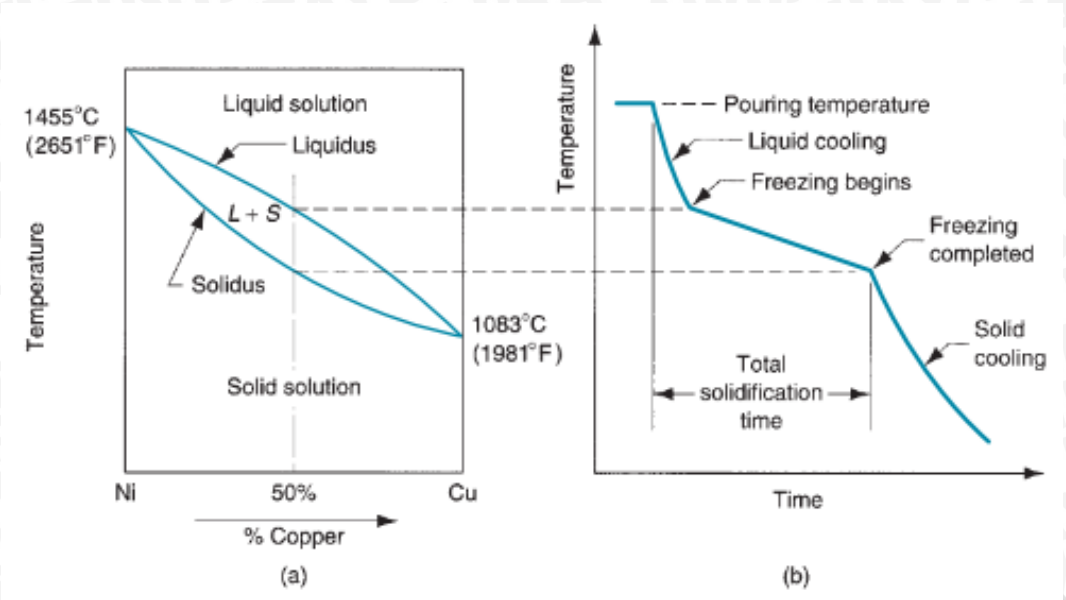
Gambar 2.5 Diagram pendinginan untuk logam murni
Sumber: kalpakjian,1989

Struktur butir pada logam coran murni didalam cetakan yang berbentuk kotak dapat dilihat pada gambar 2.6 Pada dinding cetakan, logam mendingin secara cepat sejak dinding berada pada temperatur lingkungan. Pendinginan cepat menghasilkan kulit yang dipadatkan dengan butir yang halus. Ukuran dan distribusi dari keseluruhan struktur butir pada proses pengecoran tegantung pada laju dan arah aliran panas. Hal ini penting untuk dipertimbangkan karena ukuran butir mempengaruhi kekuatan dan keuletan.



Gambar 2.6 Ilustrasi skematis dari tiga struktur pengecoran pada solidifikasi logam
Sumber: kalpakjian,1989

Berbeda dengan logam murni, solidifikasi paduan terjadi pada rentang temperatur tertentu. Solidifikasi mulai saat temperatur turun dibawah liquidus dan selesai pada saat mencapai solidus (gambar 2.7). Untuk logam paduan, titik beku dari masing-masing paduan dapat dilihat dari diagram fasa masing-masing.



Gambar 2.7 Diagram pendinginan untuk logam paduan
Sumber: Groover, 2010

2.7 Difusi

Difusi adalah peristiwa mengalirnya atau berpindahnya suatu zat dari bagian berkonsentrasi tinggi ke bagian berkonsentrasi rendah. Difusi pada logam dapat terjadi bila elemen yang berdifusi membentuk sistem larutan padat dalam matrik logam. Konsep dasar dari difusi adalah adanya migrasi atom-atom dalam material pada kondisi gas cair dan padat serta adanya gradien konsentrasi dalam bentuk termal dan potensial kimia. Dengan begitu maka material yang tidak homogen dapat juga dijadikan homogen dengan melalui proses difusi. Dalam difusi terdapat istilah panjang difusi, yaitu jarak yang mampu dilalui unsur untuk berdifusi yang berkaitan dengan koefisien difusi dan waktu.

$$L = \sqrt{4Dt} \qquad \text{(Muttharasin, M, 2014)} \qquad (2\text{-}2)$$

dengan:

L = Panjang Difusi (m)

D = difusifitas atau koefisien difusi (m^2/s)

t = waktu difusi (atom/m^3.1/atm)

Jumlah atom yang berdifusi dalam satuan waktu melalui satu satuan luas penampang sepanjang satu satuan gradient konsentrasi disebut difusivitas atau koefisien difusi. Sedangkan koefisien difusi bisa dihitung menggunakan persamaan *Arhenius*:

$$D = Do.exp^{(-\frac{Q}{RT})}$$ (Callister, W.D, 2001) (2-3)

dengan:

D = koefisien difusi (m^2/s)

Do = Koefisien difusi pada keadaan standar (m^2/s)

Q = energi aktivasi (J/mol)

R = konstanta gas (8,314 J/(mol K) atau 1,987 kal/(mol K)

T = temperatur absolut (K)

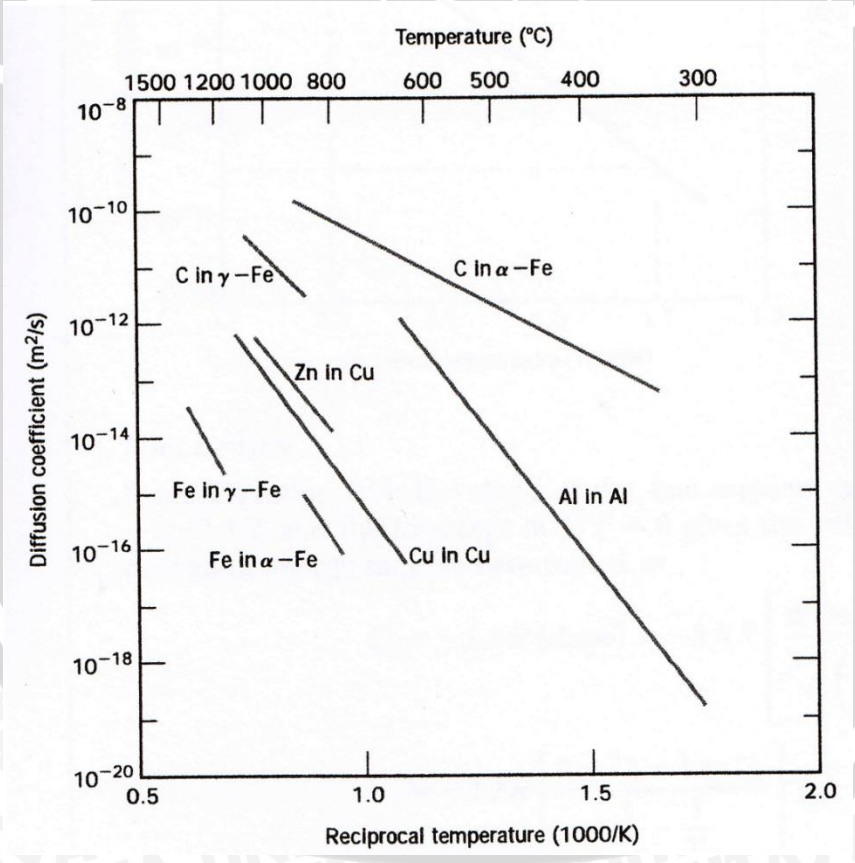
Tabel 2.5 Difusivitas Atom

Yang larut	Pelarut (struktur pelarut)	Difusivitas, m^2/s	
		500^0C	1000^0C
Karbon	Besi kps	5×10^{-15}	3×10^{-11}
Karbon	Besi kpr	10^{-12}	2×10^{-9}
Besi	Besi kps	2×10^{-23}	2×10^{-16}
Besi	Besi kpr	10^{-20}	3×10^{-14}
Nikel	Besi kps	10^{-23}	2×10^{-16}
Mangan	Besi kps	3×10^{-24}	10^{-16}
Seng	Tembaga	4×10^{-18}	5×10^{-13}
Tembaga	Aluminium	4×10^{-14}	10^{-10}
Tembaga	Tembaga	10^{-18}	2×10^{-13}
Perak	Perak (kristal)	10^{-17}	10^{-12}
Perak	Perak (batas butir)	10^{-11}	-
Karbon	Titanium hcp	3×10^{-16}	2×10^{-11}

Sumber: vlack, 1970

Difusivitas tergantung dari jenis atom yang larut, struktur bahan padat dan perubahan suhu. Perbedaan nilai difusivitas dikarenakan oleh hal-hal berikut:

1. Temperatur yang lebih tinggi menghasilkan difusivitas yang lebih tinggi pula. Atom-atom memiliki energi termal yang lebih tinggi, oleh karena itu besar kemungkinannya untuk mencapai energi yang dapat melampaui hambatan antara atom-atom
2. Karbon memiliki difusivitas yang tinggi dari pada nikel dalam besi karena atom karbon lebih kecil.
3. Tembaga lebih mudah berdifusi dalam aluminium dari pada dalam tembaga sendiri karena ikatan Cu-Cu lebih kuat dari pada ikatan Al-Al (hal ini terbukti dari titik cairnya).
4. Atom-atom memiliki difusivitas yang lebih tinggi dalam besi kpr dari pada dalam besi kps karena kpr mempunyai faktor tumpukan yang lebih rendah
5. Difusi berjalan lebih cepat melalui batas butir karena merupakan daerah dengan cacat kristal.

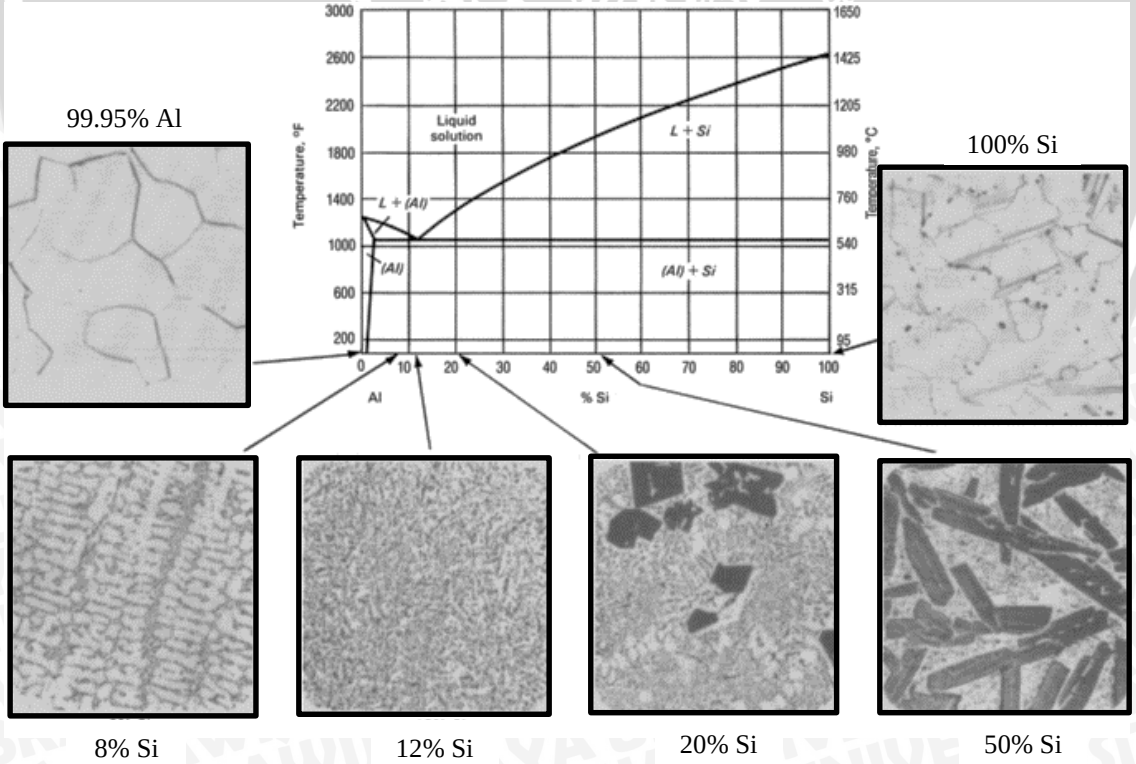


Gambar 2.8 Hubungan suhu terhadap difusivitas
Sumber: Callister, 2001

2.8 Strukturmikro Paduan Al-Si

Untuk mengetahui struktur mikro dari suatu logam diperlukan alat bantu seperti lope dan mikroskop optik. Sebelum struktur mikro dari benda uji tersebut dilihat menggunakan mikroskop, permukaannya perlu dihaluskan terlebih dahulu dengan cara dikikir, digerenda, diasah ataupun di amplas. Fungsi dari pengamatan struktur mikro adalah untuk mengetahui struktur kristal suatu material, sehingga dapat mengetahui sifat fisis dari coran tersebut.

Siswanto (2011) meneliti pengaruh temperatur dan waktu peleburan pengecoran tuang terhadap struktur mikro paduan Al-21% MG. Didalam penelitiannya menyatakan bahwa pengasahan dan pemolesan harus berarah saling tegak lurus dengan bahan poles oksida chrom. Bila permukaan sudah mengkilap cermin disapukan bahan etsa yang dapat melarutkan dengan cepat bagian-bagian tertentu dari bahan benda uji atau akan memberi warna tertentu. Sebagai bahan etsa dapat dipergunakan antara lain : baja (HNO3 =15 cc , alkohol =100 cc), Cu (CrO_3 = 50 cc, HCl = 2 tetes), Al (H F = 10 cc, H Cl =15 cc, Air = 90 cc), paduan Al (NaOH). Dari pernyataan tersebut, dapat dikatakan bahwa pengamatan struktur mikro dari paduan Al-Si menggunakan NaOH sebagai bahan etsa.



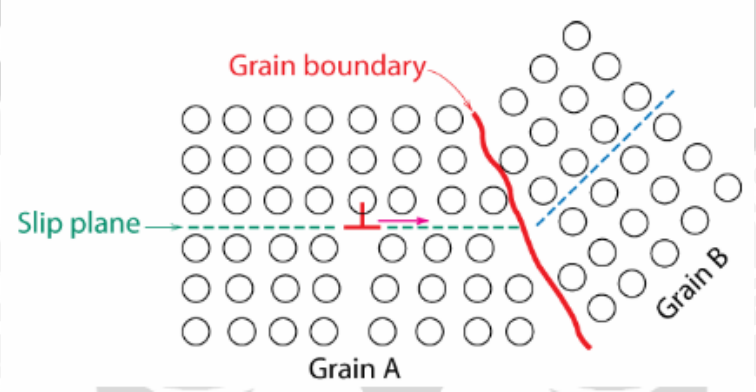
Gambar 2.9 Strukturmikro paduan Al-Si
Sumber : ASM Interrnational, 2004

Pada gambar 2.9 diatas dapat dilihat struktur mikro pada komposisi hipoeutektoid (<12% Si), hipereutektoud (>12% Si), dan satu yang mendekati komposisi eutektik pada 12%. Dari gambar tersebut yang berwarna putih adalah aluminium, sedangkan yang berwarna gelap adalah *silicon*. Semakin sedikit kadar Si pada paduan tersebut maka gambar dari mikrostrukturnya akan didominasi oleh warna putih, begitu juga sebaliknya apabila Si semakin banyak, maka warna hitam pada foto mikrostrukturnya akan semakin banyak.

2.9 Mekanisme penguatan

Mekanisme penguatan pada material logam merupakan hubungan antara pergerakan dislokasi dan sifat mekanik dari logam. Dengan mengurangi pergerakan dislokasi, kekuatan mekanik dapat ditingkatkan, yang disebabkan energi mekanik yang dibutuhkan untuk membuat deformasi plastis akan semakin besar. Sebaliknya, apabila pergerakan dislokasi tidak ada yang menahan, logam akan mudah untuk terdeformasi. Secara umum mekanisme penguatan yang digunakan pada material logam adalah melalui pengerasan regangan (*strain hardening*), penguatan larutan padat, penguatan presipitasi, dan penguatan batas butir.

Penghalusan butir adalah salah satu cara yang efektif bagi penguatan yang dihasilkan dengan menghalangi pergerakan dislokasi disekitar batas butir. Dengan mengecilnya ukuran dari butir akan meningkatkan batas butir per unit volume dan mengurangi garis edar bebas dari slip yang berkelanjutan. Pergeakan selanjutnya membutuhkan tegangan yang tinggi untuk membuka atau menghasilkan suatu dislokasi baru pada butir berikutnya. Gambar 2.11 Menunjukkan pengaruh dari batas butir terhadap pergerakan dislokasi.



Gambar 2.10 Batas butir sebagai *barrier* untuk gerakan dislokasi (searah *slip plane*)
Sumber: Norman, 2010

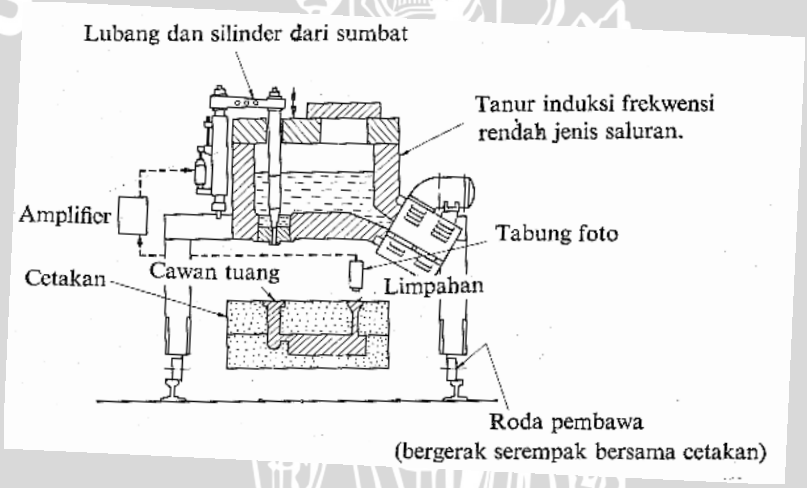
2.10 *Automatic Pouring System* (APS)

Automatic Pouring System (APS) merupakan sistem penuangan logam cair dari tungku peleburan ke cetakan yang dikerjakan secara otomatis (tidak menggunakan ladel yang dikerjakan oleh manusia) dengan menggunakan alat bantu tertentu saat penuangan yang disesuaikan dengan jenis APS yang digunakan.

Dengan adanya APS, dapat meningkatkan produktivitas dari proses pengecoran, mengurangi resiko tumpahnya logam cair keluar cetakan, dan dapat menurunkan biaya produksi. Berikut adalah jenis-jenis APS:

1. Jenis sumbat

Pada jenis ini, ladel penuangan menggunakan tanur induksi frekuensi rendah dengan sumbat yang dijalankan secara hidrolis. Sumbat ini dihubungkan dengan tabung fotosel yang digunakan untuk memberi tanda saat harus menutup sumbat. Seperti pada gambar 2.5 berikut ini.

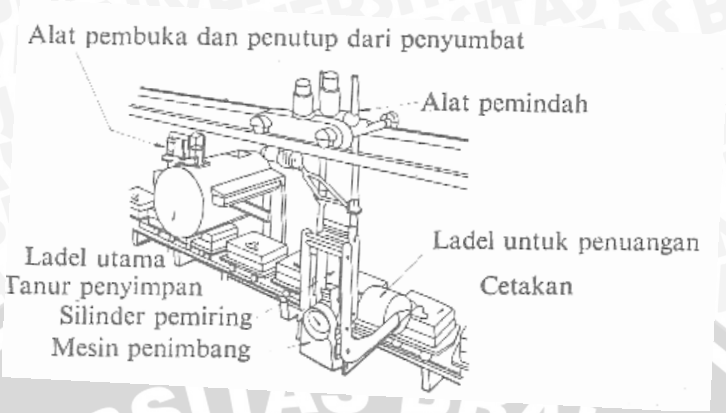


Gambar 2.11 Jenis sumbat dari peralatan penuangan otomatis dengan pemanasan induksi.
Sumber : Surdia dan Chijiwa, 1975.

2. Jenis ladel yang dapat miring

Pada APS jenis ini menggunakan ladel jenis tunggal dan gabungan yang menggabungkan tanur penyimpanan dengan beberapa ladel. Tanur yang digunakan adalah tanur dengan kapasitas dua sampai tiga ton. Untuk proses penuangannya dilakukan dengan cara memiringkan ladel secara otomatis dan untuk pengisian logam cair, ladel mendekat ke tanur penyimpanan dan secara otomatis sumbat terbuka untuk mengisi ladel

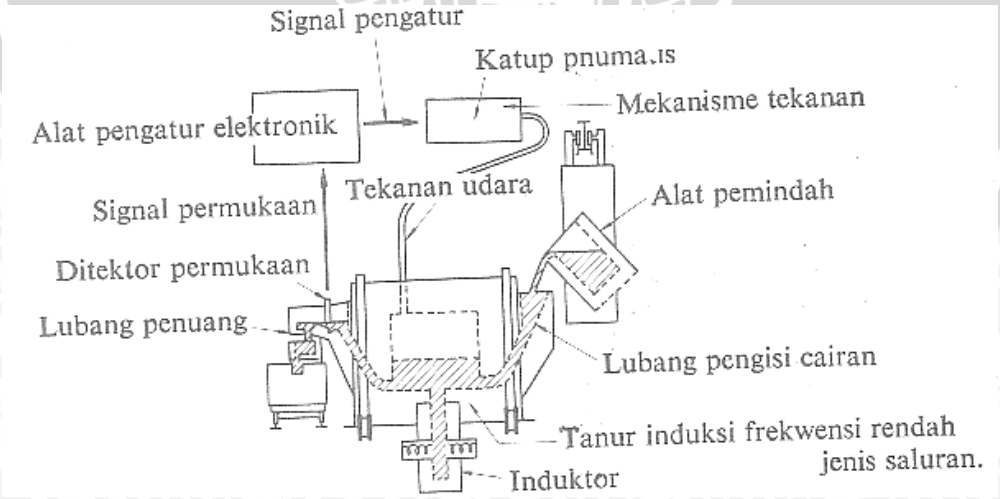
yang akan digunakan untuk menuang logam cair ke dalam cetakan. APS jenis ladel yang dapat miring dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.12 Peralatan penuangan otomatis jenis ladel yang dapat dimiringkan
Sumber : Surdia dan Chijiwa, 1975.

3. Jenis tekanan

APS jenis tekanan menggunakan tanur induksi rendah untuk menyimpan logam cair sebelum masuk lubang penuangan. Berbeda dengan dua jenis APS sebelumnya yang menggunakan sumbat untuk menyalurkan logam cair ke dalam cetakan, APS jenis ini menggunakan tekanan dari katup pneumatik untuk menyalurkan logam cair ke lubang penuangan yang kemudian memasukkannya ke dalam cetakan. Pada gambar 2.7, menggambarkan instalasi APS jenis tekanan.

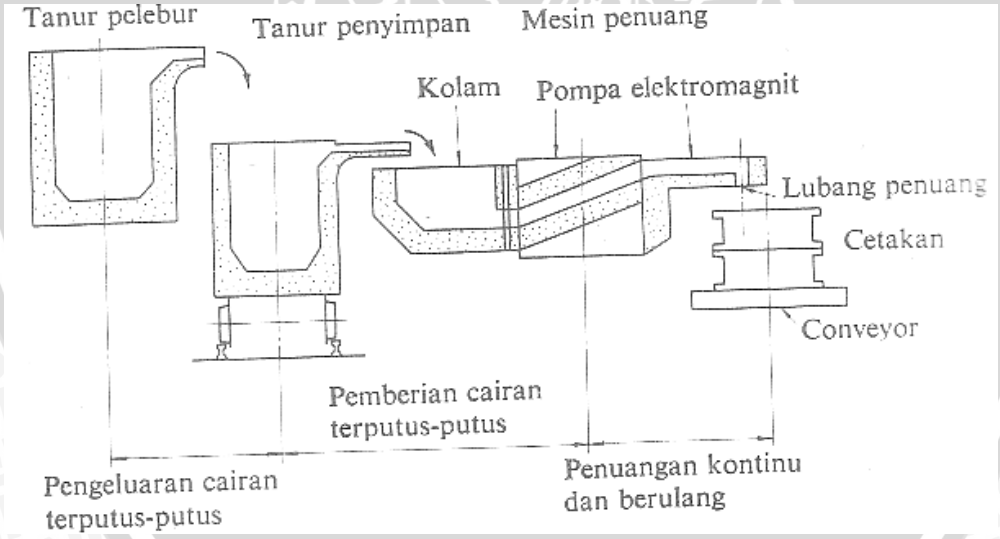


Gambar 2.13 Peralatan penuangan otomatis jenis tekanan
Sumber : Surdia dan Chijiwa, 1975

4. Jenis pompa elektromagnet

Pada APS jenis pompa elektromagnet menggunakan listrik sebagai pengatur proses penuangannya. Berbeda dengan tiga jenis APS sebelumnya yang menggunakan sistem hidrolik dan pneumatik, sehingga respon terhadap signal pengatur memerlukan waktu lebih lama. Kelebihan dari APS jenis ini adalah dapat memberikan respon yang cepat terhadap signal pengatur dan dapat diatur dari jauh karena pengaturannya menggunakan listrik. Gambaran instalasi dari APS jenis pompa elektromagnet dapat dilihat pada gambar 2.8 dan gambar 2.9.

Gambar 2.14 Alat penuang jenis pompa elektrik
Sumber : Surdia dan Chijiwa, 1975



Gambar 2.15 Aliran dari cairan logam pada alat penuangan jenis pompa elektromagnet.
Sumber : Surdia dan Chijiwa, 1975

2.11 Piston Sebagai Bahan *Recycling* Aluminium

Dalam bahasa indonesia piston memiliki istilah lain, yaitu torak. Piston adalah salah satu komponen utama pada kendaraan bermotor yang sangan memiliki peran dalam proses pembakaran pada ruang bakar. Ingot alaminium sangat dibutuhkan untuk

membentuk paduannya supaya didapatkan komposisi dan sifat-sifat sesuai yang diinginkan. Beberapa sifat yang diinginkan dari aluminium paduan pembentuk piston adalah tahan tekanan dan temperatur tinggi, tahan korosi, koefisien pemuaian rendah, dan memiliki kekuatan yang tinggi. Sifat-sifat tersebut dibutuhkan pada material pembentuk piston karena piston bekerja tanpa henti selama masin hidup. Untuk mendapatkan sifat-sifat tersebut, pabrik memilih Al-Si sebagai material paduannya.

Gambar 2.16 Piston
Sumber : Fuad, 2010

Piston dibuat dari bahan-bahan yang berkualitas supaya hasilnya juga dapat sesuai dengan kualitas yang diharapkan. Selain itu, piston juga memiliki sifat-sifat mekanik yang bagus. Oleh karena itu, ketika piston didaur ulang untuk menjadi produk aluminium paduan dengan bentuk yang berbeda, diharapkan tetap memiliki sifat-sifat mekanik yang bagus dengan biaya produksi yang murah.

2.12 Kesetimbangan Massa

Pemilihan dan penentuan macam-macam unsur paduan yang akan digunakan sebagai unsur paduan dianalisis sesuai dengan kebutuhan sifat bahan yang diinginkan, dimana proses pencampurannya dilakukan dalam keadaan cair (*liquid*). Ketika paduan dalam keadaan *liquid* maka campuran homogen dua zat atau lebih yang saling melarutkan dan masing-masing penyusunnya tidak dapat dibadakan lagi secara fisik. Untuk menyatakan hubungan kuantitatif antara zat terlarut dan pelarutnya maka dapat dilihat dari jumlah konsentrasinya. Prosentase berat merupakan salah satu bentuk konsentrasinya.

Apabila dalam suatu reaksi, larutan memiliki jumlah prosentase berat larutannya sebelum dan sesudah reaksi sama yaitu 100%, maka reaksi dapat dikatakan dalam

keadaan setimbang. Secara umum contoh kesetimbangan massa dapat dinyatakan sebagai berikut:

massa Aluminium + mass Silicon ⟶ massa produk + massa limbah

Setelah larutan tercampur sepenuhnya melalui proses peleburan dengan menggunakan suhu tinggi sesuai titik lebur masing-masing logam yang dipadukan maka dapat dilakukan proses pendinginan. Dimana atom-atom yang tersusun akan menyebar dalam larutan cair dan ketika proses pendinginan tersebut berlangsung, atom-atom akan menyusun diri membentuk butiran. Untuk mengetahui persentase berat yang terkandung pada paduan, maka dapat dilakukan pengujian komposisi paduan, salah satunya menggunakan alat *Optical Emission Spectrometer*. (Franciska, 2015)

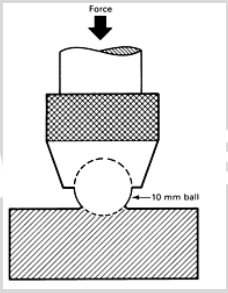
2.13 Kekerasan

Kekerasan material didefinisikan sebagai ketahanan material terhadap indentasi permanen atau deformasi saat kontak dengan indentor yang diberi beban. Berdasarkan bentuk indentornya, pengujian kekerasan dibagi menjadi tiga, yaitu indentor berbentuk bola (*brinell test*), piramida (*vicker test*), dan kerucut (*rockwell test*). Pada pengujian brinell dan vicker, nilai kekerasan ditentukan dari beban yang diberikan terhadap satuan luas dari indentor, dengan satuan kilogram per milimeter persegi (Kgf/mm^2). Sedangkan pada pengujian rockwell, kedalaman indentasi pada beban tertentu kemudian dikonversiikan ke nomor kekerasan (tanpa satuan pengukuran), yang mana berbanding terbalik dengan kedalaman.

Pengujian kekerasan diklasifikasikan berdasarkan kriteria-kriteria tertentu, termasuk dari tipe pengukurannya, besar beban indentasi, dan sifat pengujiannya. Dari tipe pengukurannya, pengujian kekerasan dapat diklasifikasikan menjadi 2, yaitu yang mengukur dimensi dari indentasi (brinell dan vicker) dan yang satu lagi mengukur dari kedalaman indentasi (Rockwell dan nano indentasi). Berdasarkan besar beban indentasi yang diberikan, pengujian kekerasan dapat dibagi menjadi 3, yaitu macrohardness(≥1 kgf), microhardness(1gf sampai 1kgf), dan yang terbaru adalah nanohardness(sekitar 0,1mN). Berdasarkan sifat pengujiannya, pengujian kekerasan dapat dibagi menjadi 3, yaitu statis, dinamis, dan goresan. Pengujian statis sama seperti brinell, vicker, atau Rockwell. Pada pengukuran dinamis, indentor dipantulkan pada permukaan benda kerja, dan tinggi pantulan indentor digunakan sebagai pengukuran kekerasannya. Pada pengujian dengan goresan material yang sudah diketahui nilai kekerasannya digunakan sebagai indentor yang digoreskan pada permukaan material yang diuji untuk menentukan

bahwa material yang diuji tersebut lebih keras atau tidak dibandingkan indentor yang digunakan.

Brinell hardness test adalah pengujian indentasi yang simpel untuk menentukan nilai kekerasan dari variasi luas pada material. Pengujian dilakukan dengan menggunakan beban konstan, biasanya antara 500 sampai 3000 kgf dengan waktu indentasi 10 hingga 30 detik dan diameter indentor (*tungsten carbide ball*) 5 sampai 10 mm.



Gambar 2.17 proses terjadinya indentasi brinell
Sumber : ASM International, 2004

Nilai kekerasan ditentukan dari diameter inti pada indentasi dan menghitung angka kekerasan brinell dari pembagian antara beban yang digunakan dengan luas permukaan indentasi yang mengacu pada rumus dibawah:

$$HB = \frac{2P}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$ (ASM International, 2004) (2-4)

dengan:
P = beban (kgf)
D = Diameter bola (mm)
d = Diameter hasil indentasi (mm)

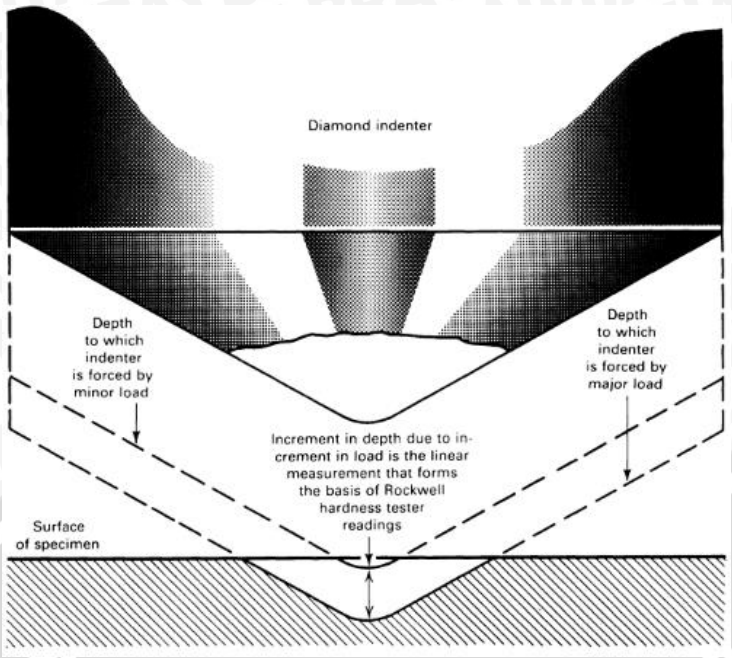
Pengujian kekerasan rockwell berbeda dengan pengujian brinnel, dalam hal ini nilai kekerasan rockwell berdasarkan pada kedalaman indentor dari dua beban yang diaplikasikan Gambar 2.19. Awalnya digunakan beban minor, kemudian setelah indentor menempel pada spesimen kemudian indikator dinolkan. Lalu beban mayor diaplikasikan untuk waktu yang ditentukan, karena adanya penambahan kedalaman penetrasi melebihi nilai nol yang sebelumnya sudah ditetapkan dari beban minor. Setelah waktu indentasi untuk beban mayor sudah ditentukan, maka indentor dikeluarkan dari spesimen dengan tetap menjaga beban minor tetap bekerja. Hasil dari nilai kekerasan rockwell

menunjukkan perbedaan di kedalaman dari posisi titik nol sebagai hasil dari aplikasi dalam beban mayor. Dari keseluruhan proses hanya membutuhkan 5-10 detik. Untuk bentuk dan beban indentor pada pengujian rockwell bervariasi sesuai dengan bahan spesimen yang diuji. Untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada tabel 2.6.

Tabel 2.6 Kekerasan standar rockwell

Scale symbol	**Indenter**	**Major load, kgf**	Typical applications
A	Diamond (two scales—carbide and steel)	60	**Cemented carbides, thin steel, and shallow case-hardened steel**
B	1/16 in. (1.588 mm) ball	100	**Copper alloys, soft steels, aluminum alloys, malleable iron**
C	Diamond	150	**Steel, hard cast irons, pearlitic malleable iron, titanium, deep case-hardened steel, and other materials harder than 100 HRB**
D	Diamond	100	**Thin steel and medium case-hardened steel and pearlitic malleable iron**
E	1/8 in. (3.175 mm) ball	100	**Cast iron, aluminum and magnesium alloys, bearing metals**
F	1/16 in. (1.588 mm) ball	60	**Annealed copper alloys, thin soft sheet metals**
G	1/16 in. (1.588 mm) ball	150	**Phosphor bronze, beryllium copper, malleable irons. Upper limit 92 HRG to avoid possible flattening of ball**
H	1/8 in. (3.175 mm) ball	60	**Aluminum, zinc, lead**
K	1/8 in. (3.175 mm) ball	150	**Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not produce anvil effect.**
L	¼ in. (6.350 mm) ball	60	**Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not produce anvil effect.**
M	¼ in. (6.350 mm) ball	100	**Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not produce anvil effect.**
P	¼ in. (6.350 mm) ball	150	**Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not produce anvil effect.**
R	½ in. (12.70 mm) ball	60	**Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not produce anvil effect.**
S	½ in. (12.70 mm) ball	100	**Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not produce anvil effect.**
V	**½ in. (12.70 mm) ball**	**150**	**Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that do not produce anvil effect.**

Sumber: ASM International, 2004



Gambar 2.18 Prinsip dalam pengujian rockwell
Sumber : ASM International, 2004

2.14 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka, *holding time* dapat mempengaruhi panjang difusi silikon didalam aluminium. Semakin panjang jarak difusi dari silikon didalam aluminium maka semakin merata pula distribusi silikon pada paduan Al-Si. Meratanya distribusi silikon pada paduan Al-Si, maka struktur kristal atau butir yang terbentuk akan semakin kecil dan menghasilkan bidang kontak antar butir semakin banyak. Ukuran butir sangat mempengaruhi sifat mekanik dari suatu material. Salah satu mekanisme penguatan adalah dengan penguatan batas butir. Penguatan batas butir adalah mekanisme penguatan dengan cara memperkecil ukuran butir, sehingga batas butir yang terbentuk semakin banyak dan dapat menghalangi pergerakan deformasi akibat adanya beban yang diberikan. Maka dapat diambil hipotesis bahwa dengan menggunakan sistem penuangan semiotomatis dan *holding time* yang semakin lama dapat memperkecil ukuran butir. Semakin kecil ukuran butir, maka bidang kontak akan semakin besar, sehingga dapat mengurangi deformasi yang terbentuk akibat indentasi pada penguhian kekerasan rockwell. Hal tersebut menyebabkan diameter hasil indentasi pada pengujian kekerasan paduan Al-Si daur ulang akan semakin kecil, sehingga nilai kekerasannya akan semakin besar.

BAB III
METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini digunakan metode eksperimental sebenarnya dimana dengan secara langsung mengetahui sejauh mana pengaruh *holding time* terhadap kekerasan paduan Al – Si pada proses pengecoran *Semiautomatic Pouring System* dengan tujuan untuk memperbaiki hasil coran paduan Al-Si daur ulang pada proses pengecoran *Semiautomatic Pouring System.*

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada tanggal 18 Maret 2015 sampai dengan 07 April 2015 serta dilakukan di Laboratorium α β γ dan Laboratorium Pengujian Bahan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.

3.2 Variabel Penelitian

Terdapat tiga variabel dalam penelitian ini, yaitu variabel bebas, variabel terikat, variabel terkontrol.

3.2.1 Variabel bebas

Variabel bebas pada penelitian ini adalah waktu penahanan pada kondisi cair paduan Al-Si (piston) yaitu: 5 menit, 10 menit, 15 menit, 20 menit, dan 25 menit.

3.2.2 Variabel terikat

Variabel terikat dari penelitian ini adalah nilai kekerasan dan strukturmikro dari hasil daur ulang Al-Si (piston).

3.2.3 Variabel terkontrol

Variabel yang dikontrol dalam penelitian ini adalah :

1. Digunakan piston dengan diameter 100 mm.
2. Temperatur peleburan yang digunakan yaitu 660^{o}C
3. Temperatur cetakan 200^{o}C
4. Volume cetakan sebesar 134,63 cc.

3.3 Persiapan Penelitian

3.3.1 Alat

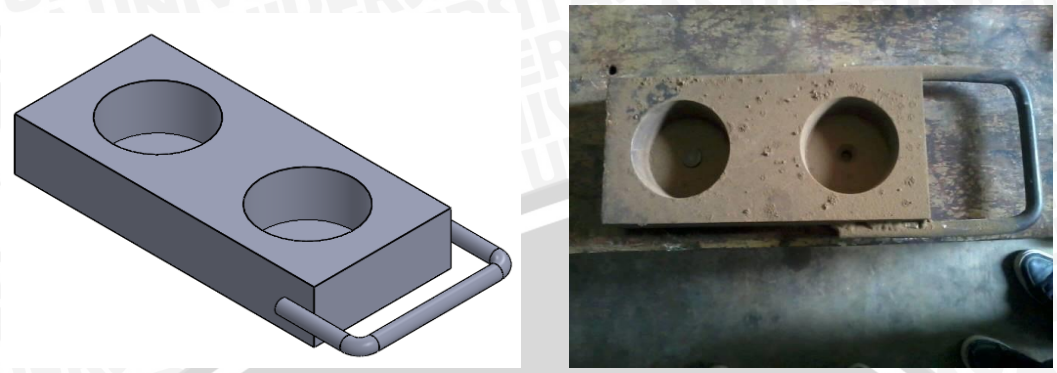
Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah sebagai berikut:

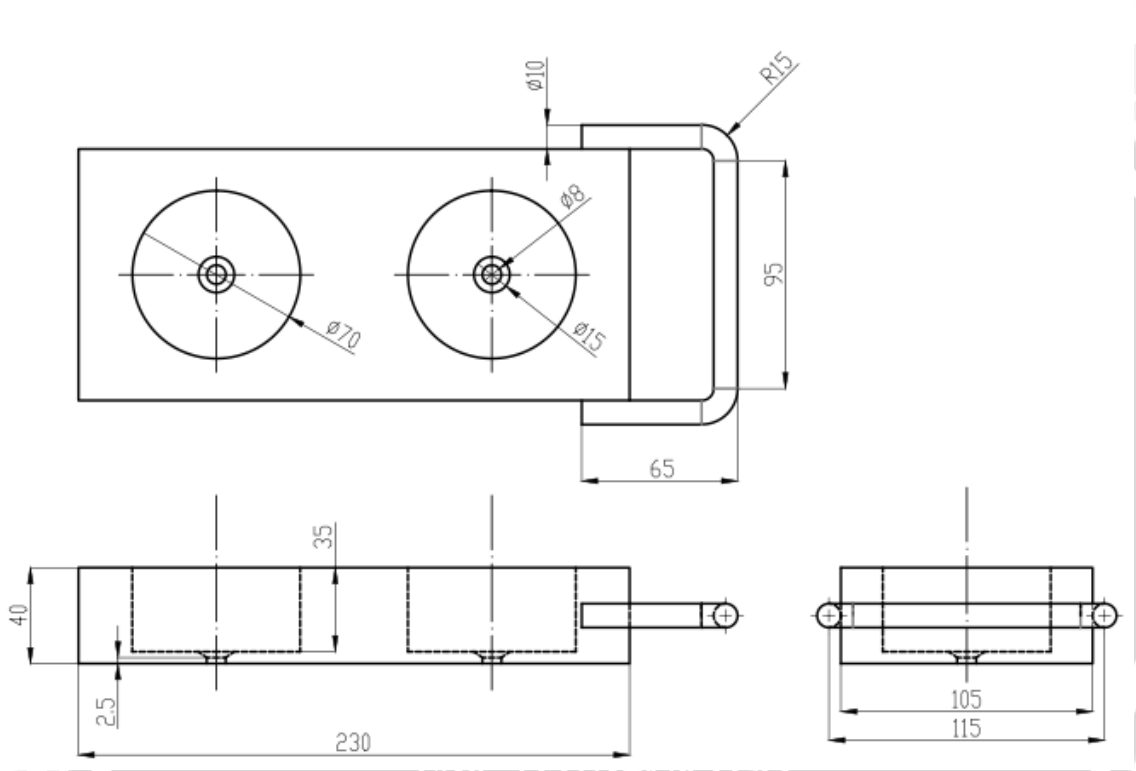
1. Timbangan elektrik
   - Kapasitas 0 – 10000 g
2. Tungku peleburan

Gambar 3.1 Tungku peleburan
Sumber: Laboratorium αβγ Malang

- Sumber panas = arus listrik
- Daya = 2640 W
- Arus = 12 A
- Tegangan = 220 V
- Kapasitas = $\pm$ 2 liter

3. Cetakan Logam (Baja)





Gambar 3.2 Cetakan logam dengan satuan milimeter (mm)

4. *Thermogun*
5. *Stopwatch*
6. Pengaduk baja
7. Penjepit baja
8. Sarung tangan

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

9. *Rockwell Hardness Test*

Gambar 3.3 *Rockwell Hardness Test*

3.3.2 Bahan

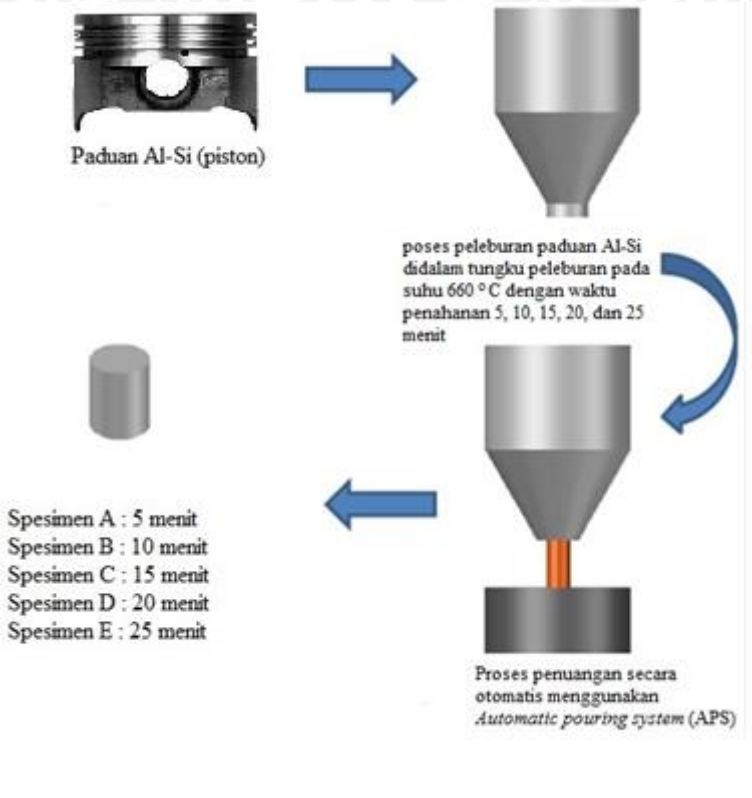
Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah sebagai berikut:

1. Paduan Al-Si (Piston) dengan kadar Si rata sebesar 12,18%. Selain unsur Si unsur lainnya juga dapat dilihat pada lampiran 1.

Gambar 3.4 Bahan *recycling*

3.4 Skema Penelitian

Skema Instalasi pada proses pengecoran dengan system penuangan otomatis APS bisa digambarkan pada gambar 3.2 berikut.

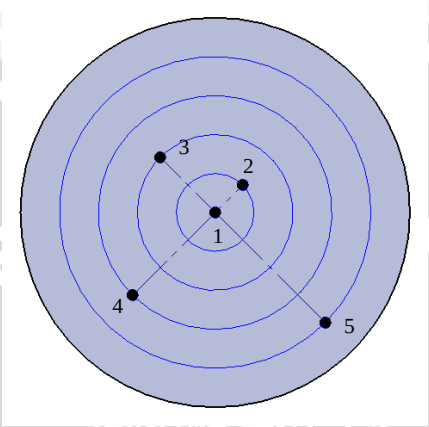


Gambar 3.5 Skema Peneleitian

3.5 Prosedur Penelitian

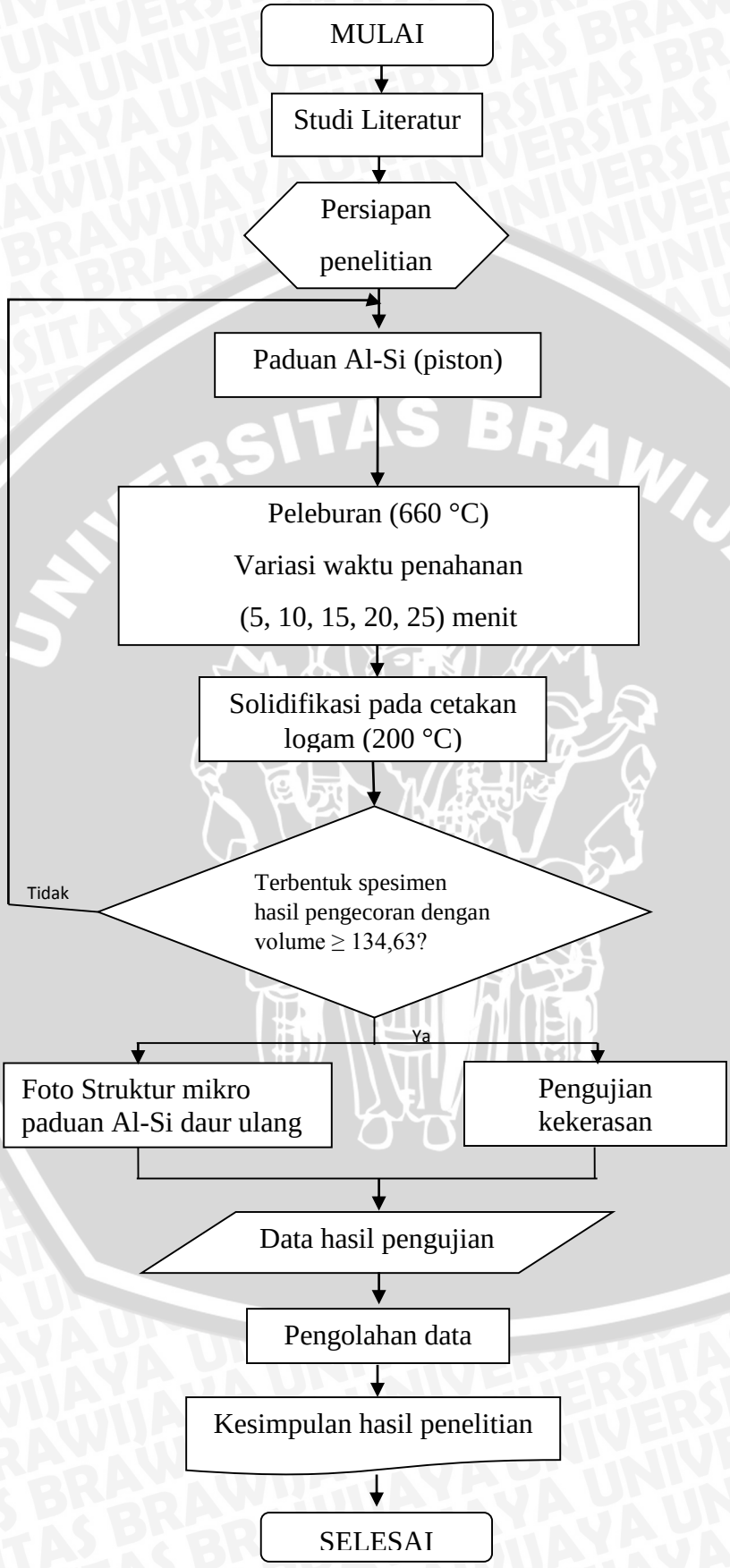
1. Paduan Al-Si (piston) disiapkan beserta alat-alat lain yang diperlukan pada proses pengecoran spesimen.
2. Memasukkan paduan Al-Si (piston) pada tungku listrik dan meleburnya dengan temperatur 660^{o}C.
3. Digunakan waktu penahanan pada suhu tersebut:
   a. Untuk spesimen A : 5 menit
   b. Untuk spesimen B : 10 menit
   c. Untuk spesimen C : 15 menit
   d. Untuk spesimen D : 20 menit
   e. Untuk spesimen E : 25 menit
4. Setelah dilebur sesuai dengan waktu yang telah ditentukan, kemudian tuangkan cairan kedalam cetakan yang sudah disiapkan (sebelum itu dilakukan pemanasan terhadap cetakan sampai suhu 200^{o}C)
5. Dilakukan proses pembubutan sebelum proses pengamplasan (amplas nomor 1-1000, kemudian digosok dengan autosol dan kain flanel) hingga rata dan halus.

6. Dilakukan pengetsaan
7. Foto Mikrostruktur pada hasil peleburan Al-Si daur ulang
8. Menguji kekerasan hasil coran paduan Al-Si daur ulang dengan mengambil sampel sebanyak 5 titik secara acak mulai dari tengah ke tepi pada bagian bawah ingot (masing-masing specimen).



Gambar 3.6 Tampak atas spesimen pengujian kekerasan

3.6 Diagram Alir Penelitian

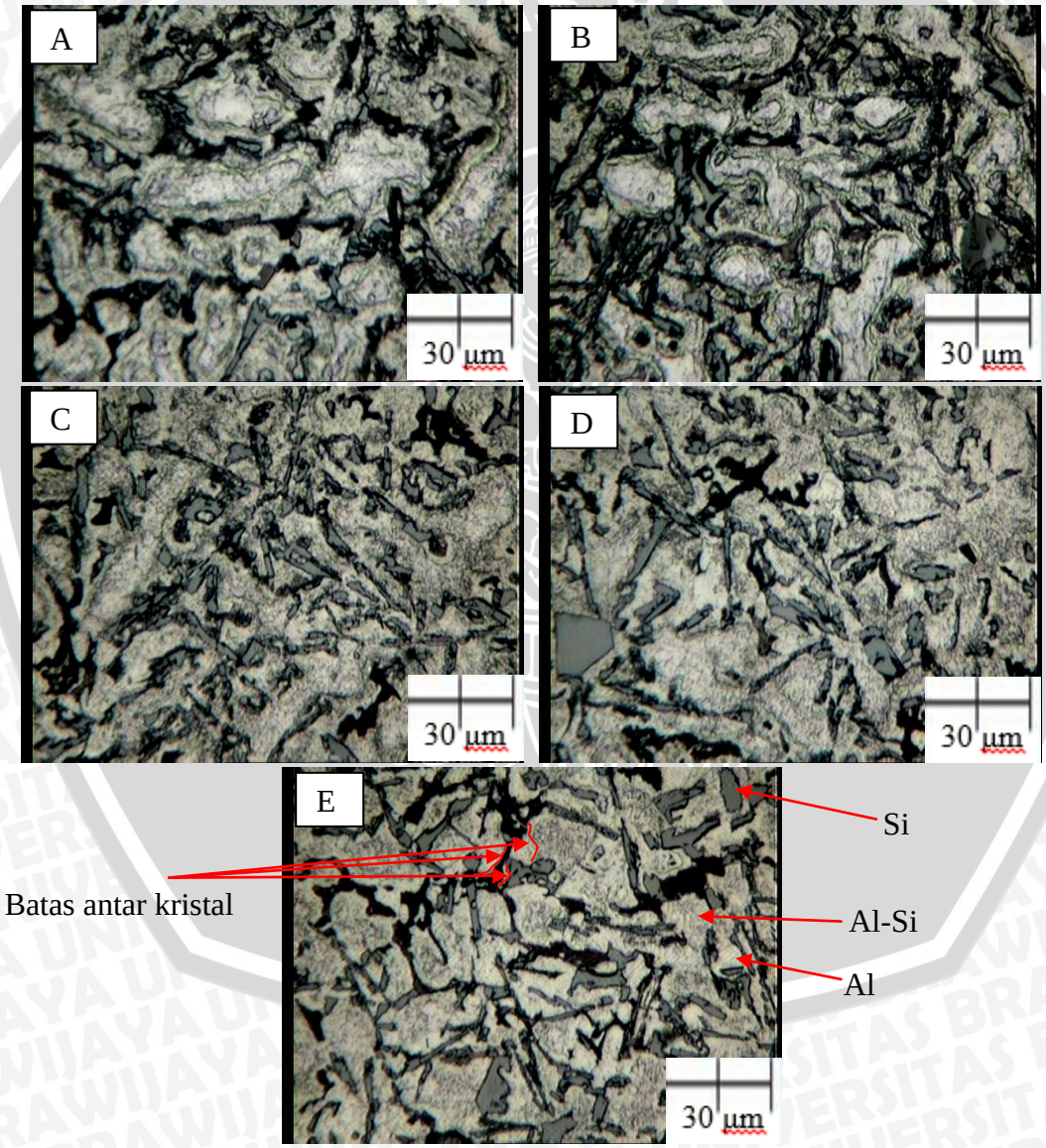


Gambar 3.7 Diagram alir penelitian

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Hasil Pengujian dan Perhitungan
4.1.1 Hasil Foto Mikrostruktur

Hasil foto mikro dari setiap spesimen *aluminium silicon* daur ulang ini dilakukan dengan menggunakan alat *microvicker* dengan perbesaran 400x. Sebelum difoto mikro spesimen terlebih dahulu diamplas dan dietsa. Gambar dari mikro struktur dari *aluminium silicon* daur ulang ini dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil Foto Mikrostruktur Dendrit Pembesaran 400x dengan waktu melt holding (A) 5 menit, (B) 10 menit, (C) 15 menit, (D) 20 menit, dan (E) 25 menit

Untuk mengetahui ukuran butir dari setiap spesimen dapat dilakukan perhitungan dengan menggunakan metode planimetri. Perhitungan dengan menggunakan metode ini memerlukan input foto mikro dan lingkaran dengan luas 5000 mm^2. Rumus matematis dari perhitungan ukuran butir adalah sebagai berikut:

$$N_A = f\,(N_{inside} + \frac{1}{2} N_{intercepted}) \quad (4\text{-}1)$$

Dengan:

N_A : jumlah butir dalam area (butir/mm^2)

N_{inside} : jumlah butir bagian dalam lingkaran

$N_{intercept}$: jumlah butir yag bersinggungan dengan lingkaran

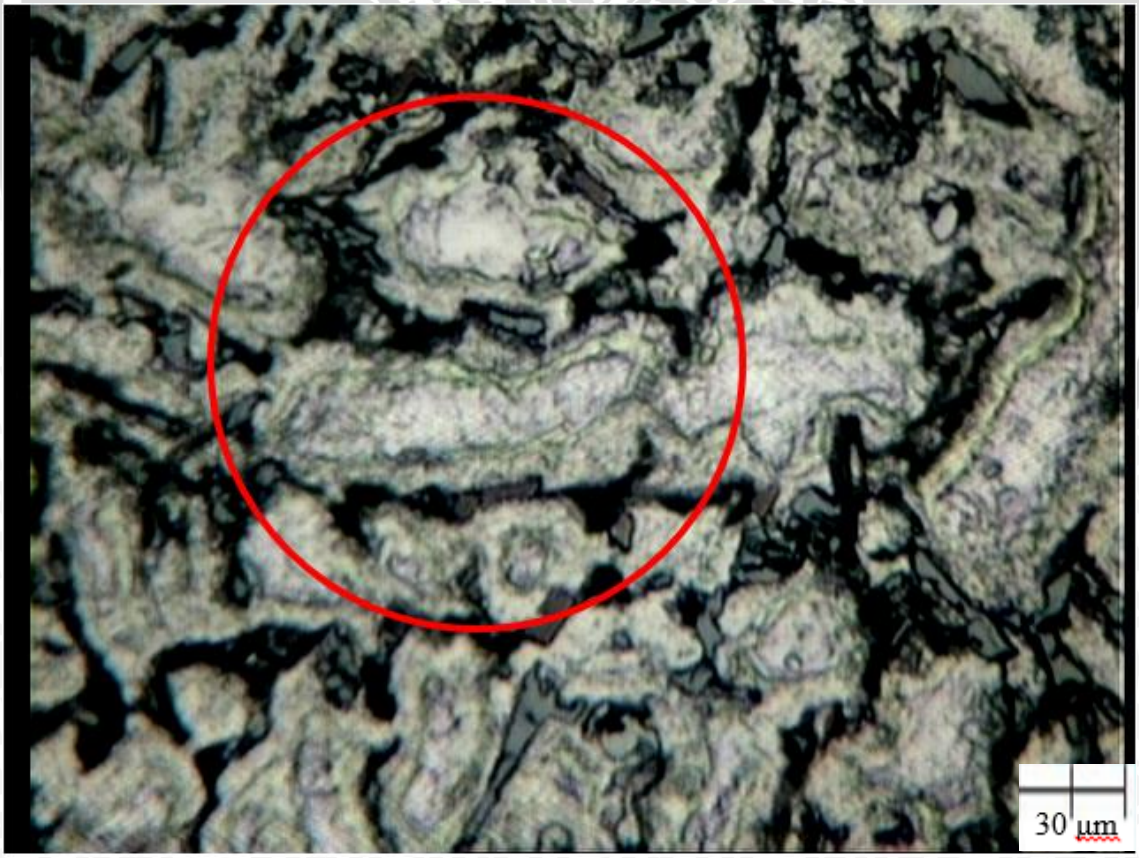
f : faktor pengali Jeffries (Pengali *Jefrries* ASTM E 112-96 2004)

$$G = \{3.322\ (\log NA) - 2.954\} \quad (4\text{-}2)$$

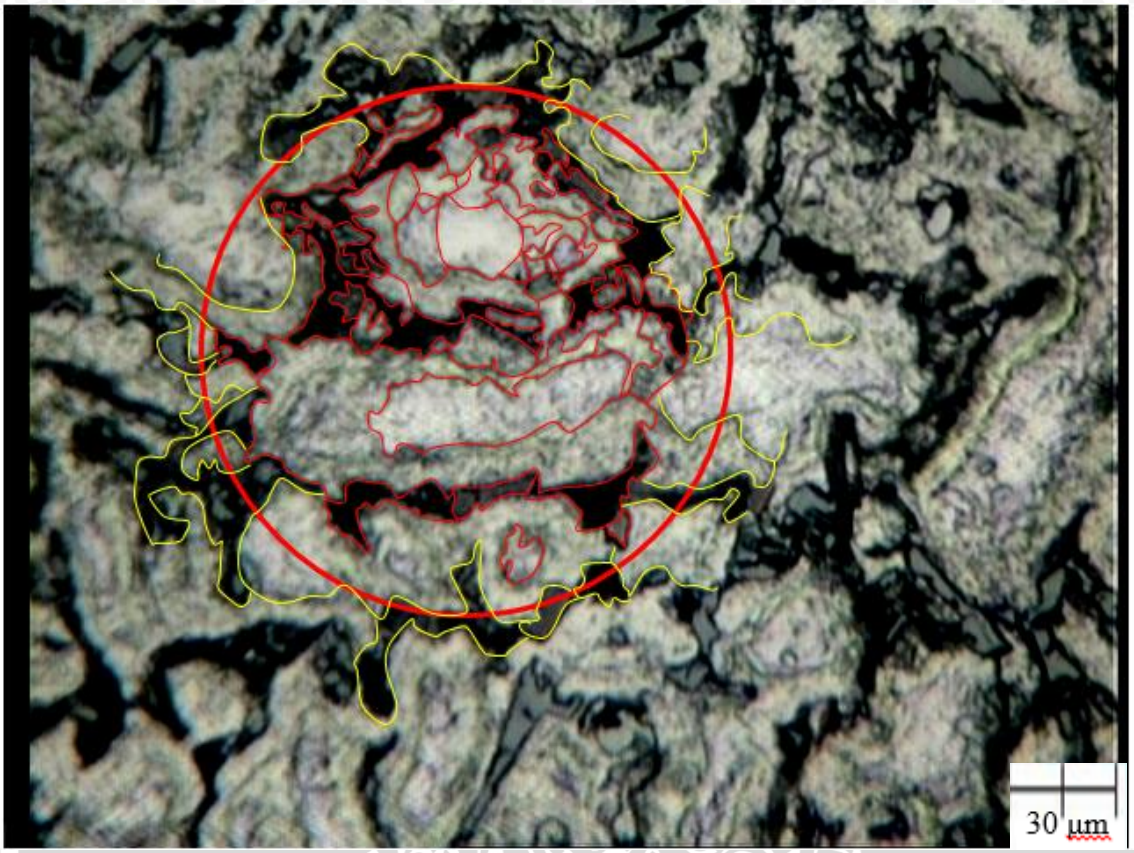
Dengan :

G : ASTM *grain size number*

Contoh perhitungan diameter butir



Gambar 4.2 foto mikro spesimen A perbesaran 400x sebelum dihitung menggunakan metode planimetri



Gambar 4.3 contoh perhitungan butir pada spesimen A perbesaran 400x dengan garis merah sebagai N_{inside} dan kuning sebagai $N_{intercept}$

$N_{interccept}$ = 21

N_{inside} = 57

$N_A = f\left(N_{inside} + \frac{1}{2} N_{intercepted}\right)$

N_A = 34 (57 +(21/2)

N_A = 34 (57 +10,5)

N_A = 2295

G = 3.322 log N_A - 2.954

G = 3.322 log 2295 – 2.954

G = 8,21

Setelah dilakukan perhitungan seperti diatas didapatkan ukuran butir dari setiap speimen yang tercantum dalam tabel ASTM E112(terlampir).

Tabel 4.1 Ukuran butir tiap spesimen

Spesimen	*Grain size no.* (G)	Diameter (µm)
A	8,21	20,988
B	8,54	18,66
C	8,84	16,86
D	8,98	16,02
E	9,11	15,328

4.1.2 Pengujian Kekerasan

Pengujian Kekerasan pada spesimen *aluminium silicon* daur ulang ini dilakukan dengan menggunakan alat *Rockwell Hardness Tester*, dengan indentor bola 1/6 in (1,588mm) yang cocok digunakan untuk aluminium paduan. Pengujian dilakukan dilima titik pada setiap spesimen yang kemudian dirata-rata dan dibandingkan nilai kekerasannya antara spesimen A sampai E. Untuk data pengujian kekerasan dapat dilihat pada tabel 4.1.

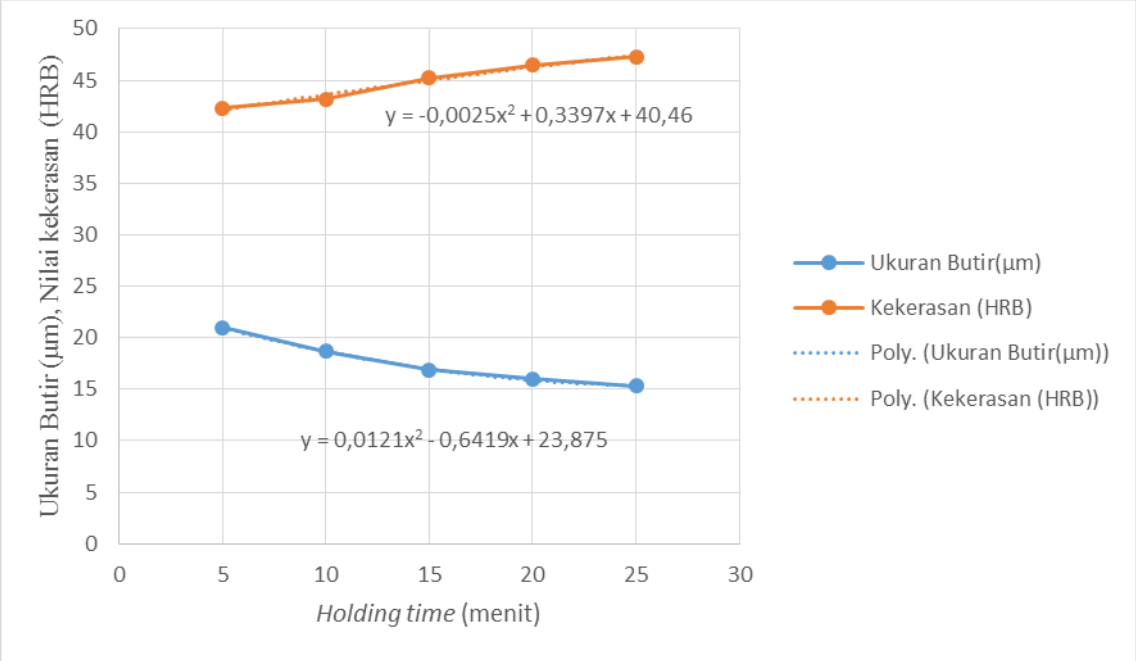
Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian Kekerasan

Spesimen	Waktu Penahanan (menit)	Titik 1 (HRB)	Titik 2 (HRB)	Titik 3 (HRB)	Titik 4 (HRB)	Titik 5 (HRB)	Rata-rata (HRB)	Skala Brinell (BHN)
Piston	-	34	34,5	47	45,5	45	41,2	81
Spesimen A	5	37,5	43	45	38,4	47,5	42,28	81,9
Spesimen B	10	39	48,5	47,4	37	44	43,18	82,65
Spesimen C	15	38	43	44	55	46	45,2	84,33
Spesimen D	20	44,2	45	47	47	49	46,44	85,44
Spesimen E	25	46	46,5	47	48	49	47,3	86,3

4.2 Pembahasan

Dari data fotomikro dan nilai kekerasan pada tabel 4.2 terdapat spesimen A sampai E. Spesimen A adalah ingot hasil daur ulang dengan waktu *holding* 5 menit, spesimen B 10 menit, spesimen C 15 menit, spesimen D 20 menit, dan spesimen E 25 menit. Dari gambar foto mikrostruktur (gambar 4.1) dapat dilihat bahwa perbedaan waktu holding mempengaruhi ukuran butir dari paduan Al-Si daur ulang. Spesimen

yang diholding selama 5 menit (spesimen A) cenderung memiliki ukuran butir yang besar, sedangkan spesimen yang diholding selama 25 menit (Spesimen E) cenderung memiliki ukuran butir yang lebih kecil dan persebarannya merata. Kemudian dari data hasil uji kekerasan (Tabel 4.1) dapat dilihat bahwa perbedaan waktu holding mempengaruhi kekerasan dari paduan Al-Si daur ulang. Spesimen yang diholding selama 5 menit (spesimen A) memiliki kekerasan paling rendah, sedangkan spesimen yang diholding selama 25 menit (spesimen E) memiliki kekerasan yang paling tinggi. Untuk mengetahui pengeruh waktu holding terhadap ukuran butir dan kekerasan dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Waktu Holding Terhadap Ukuran Butir dan Kekerasan

Dari grafik diatas dapat diketahui bahwa semakin lama waktu holding maka ukuran butir akan semakin kecil. Hal ini disebabkan dengan semakin lamanya waktu *holding* dapat memberikan waktu lebih lama pada silikon untuk berdifusi lebih jauh. Pernyataan tersebut sesuai dengan rumus panjang difusi: $L^2 = 4Dt$, dengan, L adalah panjang difusi, D adalah difusifitas atau koefisien difusi, dan t adalah waktu difusi, pada rumus tersebut menunjukkan bahwa panjang atau jarak difusi dipengaruhi oleh waktu. Semakin jauh dan banyak silikon yang berdifusi, maka persebaran dari butir silikon akan semakin merata. Dengan meratanya persebaran silikon didalam aluminium, maka didapatkan hasil struktur kristal atau butir yang berukuran kecil. Bentuk butir sangat tergantung pada pertumbuhan butir selama proses solidifikasi. Meski besar butir

dinyatakan dalam ukuran diameter, sangat sedikit sekali butiran logam yang bentuknya bulat. Bentuk butir lain adalah bentuk pipih, kolumnar dan dendritik (Vlack, 1983).

Selain menunjukkan pengaruh waktu *holding* terhadap ukuran butir, grafik diatas juga menunjukkan bahwa waktu *holding* yang semakin lama akan meningkatkan nilai kekerasan dari paduan Al-Si daur ulang. Nilai kekerasan rata-rata terkecil berada pada waktu *holding* 5 menit (spesimen A) yaitu 42,28 HRB ≈ 81,9 BHN, sedangkan nilai kekerasan yang tertinggi berada pada waktu *holding* 25 menit (spesimen E) yaitu 47,3 ≈ 86,3 BHN. Nilai-nilai kekerasan tersebut dipengaruhi oleh ukuran butir pada masing-masing spesimen.

Salah satu kelemahan dari aluminium adalah kekerasannya yang rendah dibandingkan besi dan baja. Untuk mengatasi permasalahan tersebut dapat dilakukan mekanisme penguatan. Ada 4 macam mekanisme penguatan pada aluminium, yaitu pengerasan regangan, penambahan unsur paduan, *aging*, dan penguatan batas butir. Mekanisme penguatan yang mempengaruhi nilai kekerasan pada gambar 4.3 adalah penguatan batas butir. Maksud dari penguatan batas butir adalah dengan memperkecil ukuran butir yang terbentuk sehingga menghasilkan batas butir yang banyak dan semakin kuat. Sifat mekanik dari suatu material sangat dipengaruhi oleh ukuran butir. Penghalusan butir merupakan cara yang efektif bagi penguatan yang dihasilkan dengan menghalangi pergerakan dislokasi disekitar batas butir. Butir yang semakin kecil akan mengurangi terjadinya deformasi akibat pemberian beban indentasi pada pengujian kekerasan, sehingga bekas indentasi akibat indentor tidak terlalu dalam. Oleh karena itu, apabila ukuran butir dari suatu spesimen itu kecil-kecil maka nilai kekerasannya akan semakin tinggi.

Dari tabel 4.2 dapat diketahui bahwa nilai kekerasan dari piston lebih kecil dibandingkan dengan ingot hasil daur ulang piston. Nilai kekerasan piston adalah 41,2 HRB ≈ 81 BHN, sedangkan nilai kekerasan pada ingot hasil daur ulang adalah 42,28 – 47,3 HRB ≈ 81,9 – 86,3 BHN. Hal ini dapat disebabkan oleh menguapnya unsur-unsur yang memiliki titik lebur yang lebih rendah seperti magnesium dan timbal, sehingga unsur-unsur yang memiliki titik lebur yang lebih tinggi seperti besi, tembaga, titanium, dan silikon dapat lebih dominan atau persentasenya meningkat. Dengan semakin dominannya atau meningkatnya persentase dari unsur yang memiliki titik lebur lebih tinggi tersebut, dapat meningkatkan kekerasan suatu material.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Semakin lama waktu holding menyebabkan ukuran butir yang terbentuk semakin kecil.
2. Nilai kekerasan pada paduan Al-Si daur ulang akan semakin meningkat seiring dengan penambahan waktu holding yang dilakukan pada saat peleburan.

5.2 Saran

1. Peneliti harus selalu membersihkan kotoran-kotoran(terak) yang tertinggal pada mangkok stainless di dalam tungku peleburan setiap selesai melakukan proses penuangan dari tungku ke cetakan. Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya kebocoran pada pengecoran selanjutnya karena adanya kotoran yang menyumbat.
2. Pembukaan dan penutupan sumbat harus dilakukan dengan cepat, supaya bahan daur ulang tidak banyak yang terbuang keluar cetakan.

DAFTAR PUSTAKA

Abdillah, F. 2010. Perlakuan Panas Paduan Al-Si Pada Prototipe Piston Berbasis Material Piston Bekas. Semarang : Universitas Diponegoro

ASM Handbook, vol. 2, *In Properties and Selection: Nonferrous alloy and special purpose materials.* ASM, 2004

ASM Handbook, vol. 3, *Alloy Phase Diagrams.* ASM, 2004

ASM Handbook, vol. 4, *Heat Treating.* ASM, 2004

ASM Handbook, vol. 8, *Mechanical Testing and Evaluation.* ASM, 2004

ASM Handbook, vol. 9, *Metallography and Microstructures.* ASM, 2004

ASM Handbook, vol. 15, *Casting.* ASM, 2004

ASTM E 140-02.2004

Callister, W.D. 2001. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, edisi kelima. United States of America. ISBN 0-471-39551-X

Groover, P. M. 2010. *Fundamentals of Modern Manufacturing*, edisi keempat. United States of America. ISBN 978-0470-467002

Helmi, Z. 2009. Studi pengaruh waktu penahanan terhadap jumlah partikel aluminium cair siap cetak pada proses perlakuan logam aluminium cair didapur penampung PT.Indonesia Asahan Aluminium. Medan: Universitas Sumatra Utara.

Lumley, R. 2011. *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*. United Kingdom. ISBN 978-0-85709-025-6

Muttharasan, M, dkk. 2014. *Effect of Processing Temperature and Holding Time on Al/Sic Composites: An Experimental Study*. Jurnal : ISSN 2250-3234

Norman, A. 2010. Pengendalian struktur austenit terhadap nukleasi ferit pada proses canai panas baja C-Mn. Jakarta: Universitas Indonesia.

Paranjape, S, dkk. 2010. *Automatic Pouring System Boosts Output at Mahindra Hinoday Ind*. New Delhi : Mahendra Industries and Inductotherm India Pvt.Ltd

Paryono, dkk. 2011. Pengaruh Perlakuan Panas T6 terhadap Kekerasan pada Paduan Aluminium ADC 12 Hasil Proses *High Pressure Die Casting (Hpdc)*. Jurnal Rekayasa Mesin Polines., Vol. 6, Semarang.

Raharjo,S. 2011. Analisa Pengaruh Pengecoran Ulang Terhadap Sifat Mekanik Paduan Aluminium ADC 12. Jurnal : ISBN 978-602-99334-0-6

Setyawan, S. 2006. Pengaruh Variasi Penambahan Tembaga (Cu) dan Jenis Cetakan Pada Proses Pengecoran Terhadap Tingkat Kekerasan Paduan Aluminium Silikon (Al-Si). Surakarta : Universitas Sebelas Maret

Siswanto, R. 2011. Pengaruh Temperatur dan Waktu Peleburan Pengecoran Tuang Terhadap Struktur Mikro Paduan Al-21%MG. Jurnal : ISSN 2085-3548

Surdia, T. Dan Chijiwa, K. 1975. Teknik Pengecoran Logam, cetakan ketujuh. Jakarta: PT.Pradnya Paramita

Surdia, T. Dan Saito, S. 1999. Pengetahuan Bahan Teknik, cetakan keempat. Jakarta: PT.Pradnya Paramita

Terashima, K, dkk. 2009. *Supervisory Control of Automatic Pouring Machine*. Jurnal : Control Engineering Practice 18 (2010) 230-241

Vlack, V. 1970," Material Science for Engineers ",Massachusetts: Addison-Wesley.

Xu-liang, M, dkk. 2010. *Effect of Al5Ti1B Master Alloy on Microstructures and Properties of AZ61 Alloys*. Jurnal : Trans.Nonferrous Met.Soc. China 20 (2010) s397-s401

Lampiran 1

SPECTRO

PT.H.P.METALS INDONESIA

122804

Method: Al-SS-6063 2/26/2015 5:04:06 PM
Comment: Al-Base SS-6063 Element Concentration
Sample No.: Sample ID:

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	12.13	0.429	1.07	0.0288	1.31	0.0209	0.0390	0.0213
2	12.18	0.423	1.04	0.0279	1.27	0.0203	0.0388	0.0214
3	12.23	0.416	1.04	0.0283	1.28	0.0205	0.0386	0.0213

	Na	Ca	Ni	Pb	P	Sn	Sb	Sr
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	< 0.00005	0.00053	1.20	0.0060	0.00094	0.0015	< 0.00040	< 0.00010
2	< 0.00005	0.00055	1.14	0.0056	0.00094	0.0014	0.00063	< 0.00010
3	< 0.00005	0.00058	1.15	0.0058	0.00093	0.0015	< 0.00040	< 0.00010

	Be	Zr	Bi	Cd	Al			
	%	%	%	%	%			
1	0.00028	0.0020	< 0.00030	0.0013	83.7			
2	0.00027	0.0019	< 0.00030	0.0013	83.8			
3	0.00027	0.0020	< 0.00030	0.0012	83.8			

AB 26/ 2015

JEFFRY

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Lampiran 2

TABLE 4 Grain Size Relationships Computed for Uniform, Randomly Oriented, Equiaxed Grains

Grain Size No. G	$\bar{N}_A$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{d}$ Average Diameter		$\bar{\ell}$ Mean Intercept		$\bar{N}_L$
	No./in.^{2} at 100X	No./mm^2 at 1X	mm^2	μm^2	mm	μm	mm	μm	No./mm
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

TABLE 5 Relationship Between Magnification Used and Jeffries' Multiplier, f, for an Area of 5000 mm^2 (a Circle of 79.8-mm Diameter) ($f = 0.0002\ M^2$)

Magnification Used, M	Jeffries' Multiplier, f, 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 mm^2 (a circle of 84.5-mm diameter).

Lampiran 3

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
FAKULTAS TEKNIK JURUSAN MESIN UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LABORATORIUM PENGUJIAN BAHAN

Jl. Mayjen Haryono 167 Telp. 553286 Pes. 1214 Malang 65145

DATA HASIL PENGUJIAN

Jenis Pengujian : Pengujian Kekerasan Rockwell Hardness Tester
Satuan : HRB
Bahan : Logam Paduan Al-Si
Penguji : Muhammad Syarif Rasyid
Nim. : 115060200111022
Program Studi : Jurusan Teknik Mesin
Instansi : Universitas Brawijaya Malang
Tanggal Pengujian : 03 April 2015

Waktu Holding	Kekerasan (HRB)				
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5
5 menit	37,5	43	45	38,4	47,5
10 menit	39	48,5	47,4	37	44
15 menit	38	43	44	55	46
20 menit	44,2	45	47	47	49
25 menit	46	46,5	47	48	49

Malang, 07 April 2015
Ka. Lab. Pengujian Bahan

Ir. Erwin Sulistyo, MT.
NIP. 19661213 199802 1 001

Lampiran 4

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
FAKULTAS TEKNIK JURUSAN MESIN UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LABORATORIUM PENGUJIAN BAHAN

Jl. Mayjen Haryono 167 Telp. 553286 Pes. 1214 Malang 65145

DATA HASIL PENGUJIAN

Jenis Pengujian	: Pengujian Kekerasan Rockwell Hardness Tester
Satuan	: HRB
Bahan	: Logam Paduan Al-Si
Penguji	: Muhammad Syarif Rasyid
Nim.	: 115060200111022
Program Studi	: Jurusan Teknik Mesin
Instansi	: Universitas Brawijaya Malang
Tanggal Pengujian	: 04 Mei 2015

Benda Kerja	Kekerasan (HRB)				
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5
Piston	34	34,5	47	45,5	45

Malang, 06 Mei 2015
Ka. Lab. Pengujian Bahan

Ir. Erwin Sulistyo, MT.
NIP. 19661213 199802 1 001