

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam industri manufaktur tentu membutuhkan suatu bahan baku mentah untuk diproses menjadi produk setengah jadi maupun produk jadi. Ada dua metode untuk mendapatkan suatu bahan baku, diantaranya metode primer dan sekunder. Metode primer yaitu mengekstraksi bijih logam menjadi logam murni, contohnya ekstraksi bijih bauksit menjadi aluminium murni. Metode sekunder yaitu proses melebur kembali produk-produk bekas yang tidak terpakai atau tidak dibutuhkan yang disebut juga *recycling*. *Recycling* ini termasuk dalam proses manufaktur yaitu *casting*, dimana proses-prosesnya terdapat *melting*, *pouring*, dan *solidifying*. Sedangkan istilah *recycling* bisa disebut juga *remelting* yang berarti melebur kembali hasil produksi yang tidak terpakai.

Aluminium merupakan salah satu material yang paling sering digunakan dalam proses *recycling* karena banyaknya komponen-komponen yang habis masa pakainya. Selain itu, fungsi *recycling* untuk mengurangi rongsokan agar tidak menimbulkan polusi untuk lingkungan sekitar. Aluminium mudah didaur ulang karena memiliki titik lebur yang relatif rendah dibanding logam lain  $660,32^{\circ}\text{C}$ , maka waktu peleburan tidak lama dan tidak menghabiskan energi yang terlalu banyak sehingga dapat dikatakan mempunyai nilai ekonomis. Dengan proses daur ulang aluminium, ketersediaan bahan baku aluminium lebih terjamin dari adanya metode sekunder karena penggunaan energi yang dibutuhkan saat peleburan hanya membutuhkan 5% dari metode primer (Puga, 2009).

Pengecoran (*casting*) merupakan salah satu metode yang sering digunakan dalam proses manufaktur karena keuntungannya dalam memilih bahan yang tidak terlalu selektif, dapat digunakan untuk membuat benda-benda dengan bentuk sederhana sampai rumit, dari ukuran kecil sampai besar, dan hasil coran mendekati produk jadi. Untuk menghasilkan produk coran yang baik, aluminium dapat dipadukan dengan unsur lain guna mendapatkan karakteristik seperti kekuatan tarik, ketahanan korosi, kekerasan, sifat mampu mesin, mampu cor, mampu tempa, dan sifat mekanik lainnya. Salah satu alat untuk proses pengecoran yaitu dengan menggunakan dapur listrik atau *electrical furnace*. Dapur ini menghasilkan panas secara induksi dari kumparan kawat tembaga yang dialirkan listrik. Kumparan ini menciptakan medan magnet yang cepat berbalik menembus logam. Medan magnet menginduksi arus *eddy* dari arus listrik yang

melingkari logam dengan induksi elektromagnetik. Arus *eddy* inilah yang menghasilkan panas yang mengalir melalui hambatan listrik dari logam yang akan dilebur. Keuntungan dari dapur listrik ini yaitu bersih, efisiensi energi tinggi, dan proses peleburan yang terkontrol. Selain itu, karena tidak adanya busur (*arc*) atau proses pembakaran, temperatur dari material tidak lebih tinggi dari yang dibutuhkan untuk peleburan yang dapat mencegah adanya hilangnya atau kerugian dari nilai elemen paduan (*alloy*).

Hasil proses manufaktur dari suatu komponen pada saat digunakan dalam suatu struktur konstruksi seperti bangunan ataupun kendaraan mengalami beban tarik sehingga komponen tersebut harus mendapatkan jaminan terhadap kerusakan akibat gaya tarik yang didapat, yang bertujuan untuk keamanan dalam penggunaan untuk memperpanjang usia pakai (*life time*). Untuk itu tentunya perlu diketahui sifat mekanis dari material yang digunakan agar perencanaan konstruksi nantinya tidak mengalami kegagalan.

Penelitian eksperimental telah dilakukan pada pengecoran aluminium paduan, Purwanto (2010) dalam penelitiannya yang berjudul pengaruh pengecoran ulang terhadap kekuatan tarik dan kekerasan pada aluminium cor dengan cetakan pasir didapatkan hasil bahwa pengecoran ulang dengan menggunakan *reverberatory furnace* menyebabkan penurunan pada kekuatan tarik tiap tingkatan *recycling*-nya.

Sesuai dengan penjelasan di atas, maka penulis ingin melakukan penelitian tentang pengaruh tingkat *recycling* aluminium struktur terhadap karakteristik kekuatan tarik dan kesetimbangan massa pada *electrical furnace*. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan produk dari aluminium daur ulang yang dapat digunakan untuk proses manufaktur lainnya dan mengurangi limbah aluminium yang tidak terpakai.

## 1.2 Rumusan Masalah

Adapun yang menjadi rumusan masalah dalam pengerjaan penelitian ini adalah bagaimana pengaruh tingkat *recycling* aluminium struktur terhadap karakteristik tarik (*tensile*) dan kesetimbangan massa di setiap tingkatannya pada proses pengecoran dengan *electrical furnace*?

## 1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan dari materi skripsi yang penulis ajukan lebih terarah, maka perlu diberikan batasan masalah. Batasan masalah dari skripsi ini adalah:

1. Kecepatan dan temperatur saat penuangan logam cair dijaga konstan
2. Sistem paduan dari Aluminium Struktur adalah Al-Mg

3. Karakteristik kekuatan tarik (*tensile strength*) dan *yield casting* hasil coran sebagai variabel terikat
4. Jumlah tingkat *recycling* yang dilakukan mencapai 4 tingkatan

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Dapat menyediakan *ingot* (bahan baku) untuk proses pengecoran, penempaan, permesinan, maupun *roll forming* yang diharapkan memiliki sifat mampu mesin, mampu tempa, mampu cor, dan mampu bentuk yang baik.
2. Mengetahui sejauh mana pengaruh tingkat *recycling* terhadap karakteristik tarik (*tensile*) dan kesetimbangan massa aluminium struktur pada proses pengecoran dengan *electric furnace*.
3. Mengetahui efisiensi seberapa besar karakteristik tarik (*tensile*) dan kesetimbangan massa aluminium struktur pada tiap tingkatan *recycling*.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian yang saya ajukan adalah:

1. Memberikan pengetahuan baru pada penulis maupun pembaca khususnya pada bidang pengecoran logam.
2. Dapat digunakan sebagai studi literatur pada penelitian selanjutnya mengenai daur ulang aluminium struktur dengan proses pengecoran menggunakan *electrical furnace*.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Raharjo (2011) dalam penelitiannya yang berjudul “*Analisa Pengaruh Pengecoran Ulang Terhadap Sifat Mekanik Paduan Aluminium ADC 12*” didapatkan hasil bahwa proses *remelting* dengan menggunakan *reverberatory furnace* yang dilakukan menyebabkan perubahan komposisi material aluminium *Silicon* pada temperatur tuang 700°C yang semula presentase Al 84.68% dan Si 11.0% menjadi 85.33% Al dan 10.5% Si.

Purwanto (2010) dalam penelitiannya yang berjudul “*Pengaruh Pengecoran Ulang Terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan pada Aluminium Cor dengan Cetakan Pasir*” didapatkan hasil bahwa Pengecoran ulang dengan menggunakan *reverberatory furnace* menyebabkan penurunan pada kekuatan tarik yaitu dari pengecoran I ke pengecoran II turun sekitar 3.9% sedang penurunan dari pengecoran ulang II ke pengecoran III turun 8.9% atau rata-rata penurunan setelah dilakukan pengecoran ulang adalah 6.4%. Pengecoran ulang juga berpengaruh pada penurunan regangan. Rata-rata penurunannya sebesar 11% .

#### 2.2 Aluminium

Pada tahun 1809, Sir Humphrey Davy adalah orang pertama kali yang menemukan Aluminium sebagai unsur yang pertama kali direduksi sebagai logam pada tahun 1825 oleh H. C Oersted. Sedangkan pada tahun 1886, Paul Heroult asal Perancis dan C.M.Hall asal Amerika Serikat secara terpisah memperoleh logam aluminium murni dari alumina dengan metode elektrolisis pada garam untuk berfusi agar aluminium dengan oksigen terpisah akibat lepasnya elektron melalui metode ini. Penggunaan aluminium sebagai logam tiap tahunnya termasuk pada urutan kedua setelah baja dan besi yang tertinggi diantara logam *non-ferrous*. (Surdia dan Saito, 1999)

Aluminium adalah logam *non ferrous* yang banyak terdapat dikerak bumi dan unsur ketiga terbanyak setelah oksigen dan silikon. Aluminium juga sering dikatakan sebagai logam yang ringan karena memiliki densitas  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , atau dapat dikatakan berat aluminium hanya 1/3 dari berat jenis besi (Fe) maupun tembaga (Cu). Aluminium juga memiliki sifat thermal yang sangat baik sehingga sering digunakan untuk mesin-mesin penukar panas. Selain sifat thermal, aluminium juga memiliki daya hantar listri yang bagus yaitu 60% lebih baik dari tembaga. Selain sifat-sifat tersebut, pesatnya perkembangan

aluminium pada sektor industri juga ditunjang oleh mudahnya pengolahan aluminium yang memiliki titik lebur  $660,32^{\circ}\text{C}$  sehingga dapat menghemat biaya dalam proses produksinya.

Sumber penghasil aluminium terbesar di Indonesia terdapat di daerah Bintan dan Kalimantan, karena pada daerah tersebut terdapat banyak bijih bauksit yang biasa digunakan sebagai sumber bijih untuk mendapatkan aluminium. Untuk menghasilkan 500 kg aluminium diperlukan 550 kg bauksit, 450 kg NaOH, 31.5 ton  $\text{H}_2\text{O}$  dan 7,5 ton uap. Bauksit dapat juga diolah menggunakan proses elektrolisis. Untuk 1 kg aluminium diperlukan 4 kg bauksit, 0.6 kg karbon, dan kriolit (Ismawanto, 2014).

Aluminium memiliki sifat ketahanan korosi yang tinggi yang disebabkan oleh lapisan pasif aluminium oksida, alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) yang terbentuk karena aluminium mudah teroksidasi oleh oksigen. Aluminium memiliki struktur Kristal FCC sehingga memiliki *ductility* yang tinggi. Aluminium pada umumnya dipadukan dengan unsur lain untuk memperbaiki sifat mekanik ataupun kimia dari aluminium tersebut beserta fungsi-fungsi tertentu.

Semua sifat-sifat dasar aluminium, dipengaruhi oleh efek dari berbagai elemen aluminium paduan. Unsur-unsur paduan utama dalam pengecoran aluminium paduan dasar adalah tembaga, silikon, magnesium, seng, kromium, mangan, timah, dan titanium. Aluminium paduan bisa saja secara umum akan ditandai sebagai sistem eutektik, mengandung bahan intermetalik atau unsur-unsur sebagai fase berlebih.

Tabel 2.1 Sifat fisik aluminium murni.

Sifat – Sifat	Kemurnian Al (%)	
	99,996	>99,0
Massa Jenis ( $20^{\circ}\text{C}$ )	2,6989	2,71
Titik Cair ( $^{\circ}\text{C}$ )	660,2	653 – 657
Panas Jenis ( $\text{cal/g}^{\circ}\text{C}$ ) ( $100^{\circ}\text{C}$ )	0,2226	0,2297
Hantaran Listrik	64,94	59 (dianil)
Tahanan Listrik Koefisien	0,00429	0,0115
Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )		
Koefisien Pemuaihan ( $20\text{--}100^{\circ}\text{C}$ )	$23,86 \times 10^{-6}$	$23,5 \times 10^{-6}$
Jenis Kristal, konstanta kisi	FCC, $a = 4,013 \text{ Kx}$	FCC, $a = 4,04 \text{ kX}$

Sumber : Surdia dan Chijiwa, 1975

Aluminium merupakan salah satu material yang paling luas penggunaannya di kehidupan sehari-hari. Aluminium banyak digunakan di semua sektor utama industri seperti transportasi, konstruksi, listrik, peti kemas dan kemasan, alat rumah tangga serta peralatan mekanis. Adapun keunggulan dari sifat-sifat umum aluminium antara lain sebagai berikut:

1. *High strength to weight ratio*, dengan rasio berat yang relatif kecil namun memiliki kekuatan yang besar
2. Tahan terhadap korosi, sifat ini terbentuk karena adanya lapisan pasif  $Al_2O_3$ , 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 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

### 2.2.1 Aluminium Struktur

Aluminium struktur adalah aluminium yang digunakan pada suatu struktural bangunan maupun otomotif. Pada umumnya, fungsi aluminium struktur adalah dapat menompang suatu beban tarik maupun fatik yang selalu berhubungan dengan berapa lama durabilitas atau ketahanan material tersebut sebelum terjadinya *failure* atau kegagalan. Pada umumnya, seri yang digunakan untuk aluminium struktur adalah seri Al-Mg (5000) dan seri Al-Mg-Si (6000) karena memiliki sifat *extrudeability (formability)* dan tahan terhadap korosi yang baik (Kissell, 2002). Sedangkan sistem paduan Aluminium Struktur yang digunakan adalah Al-Mg pada penelitian ini adalah seri Al-Mg.

### 2.2.2 Aluminium dan Paduannya

Hasil uji komposisi untuk aluminium struktur yang akan digunakan dalam penelitian kali ini adalah sebagai berikut.

Tabel 2.2 Komposisi Aluminium Struktur

Elemen	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Na	Ca	Ni	Pb	Pb	Sn	Sb	Sr	Be	Zr	Bi	Cd	Al
Presentase	0.4500	0.3650	0.8868	0.0532	9.5500	0.0112	0.0649	0.0116	0.0001	0.0011	0.0064	0.0081	0.0005	0.0031	0.0004	0.0001	0.0001	0.0011	0.0004	0.0007	89.4

Dari data di atas dapat dipahami bahwa aluminium struktur yang digunakan adalah paduan Aluminium Magnesium (Al-Mg) dengan presentase Aluminium dan Magnesium masing-masing 89,4% dan 9,55%.

Dalam keadaan murni, sifat dari aluminium terlalu lunak, terutama kekuatan mekaniknya. Dengan pemaduan sifat dari aluminium, sifat tersebut dapat diperbaiki, tetapi sering sekali sifat tahan korosinya berkurang, demikian juga sifat keuletannya (*ductility*). Berdasarkan klasifikasinya aluminium dibagi dalam tujuh jenis yaitu :

1. Jenis Al-murni (1000)

Jenis Al-murni ini adalah aluminium dengan kemurnian antara 99% s/d 99,9%, aluminium dari seri ini disamping sifatnya baik dan tahan karat,

2. Jenis Al-Cu (2000)

Adalah jenis yang dapat diperlakukan panaskan, dengan melalui pengelasan endap atau penyempuhan sifat mekanik. Paduan ini dapat menyamai sifat-sifat dari bajak lunak, tetapi dayan tahan korosinya rendah bila dibandingkan dengan jenis paduan lainnya.

3. Jenis Al-Mn (3000)

Adalah jenis yang tidak diperlakukan panaskan sehingga kenaikan kekuatannya hanya dapat diusahakan melalui pengerjaan dingin dalam proses pembuatannya dari segi kekuatan jenis paduan ini lebih unggul dari pada jenis Aluminium murni.

4. Jenis Al-Si (4000)

Adalah jenis yang tidak termasuk diperlakukan panaskan. Jenis ini dalam keadaan cair mempunyai sifat mampu alir yang baik dan dalam proses pembekuannya hampir tidak terjadi retak.

5. Jenis Al-Mg (5000)

Adalah jenis paduan yang tidak dapat diperlakukan panaskan. Tetapi mempunyai sifat yang baik dalam daya tahan korosi.

6. Jenis Al-Mg-Si (6000)

Adalah jenis yang termasuk diperlakukan panaskan dan mempunyai sifat mampu potong dan daya tahan korosi yang sangat tinggi.

7. Jenis Al-Zn (7000)

Adalah jenis yang dapat diperlakukan panaskan dan daya tahan korosi yang kurang menguntungkan.

Magnesium paduan banyak digunakan pada komponen struktur pesawat, otomotif maupun elektronik. Dalam paduan biner Al-Mg satu fase yang ada dalam keseimbangan

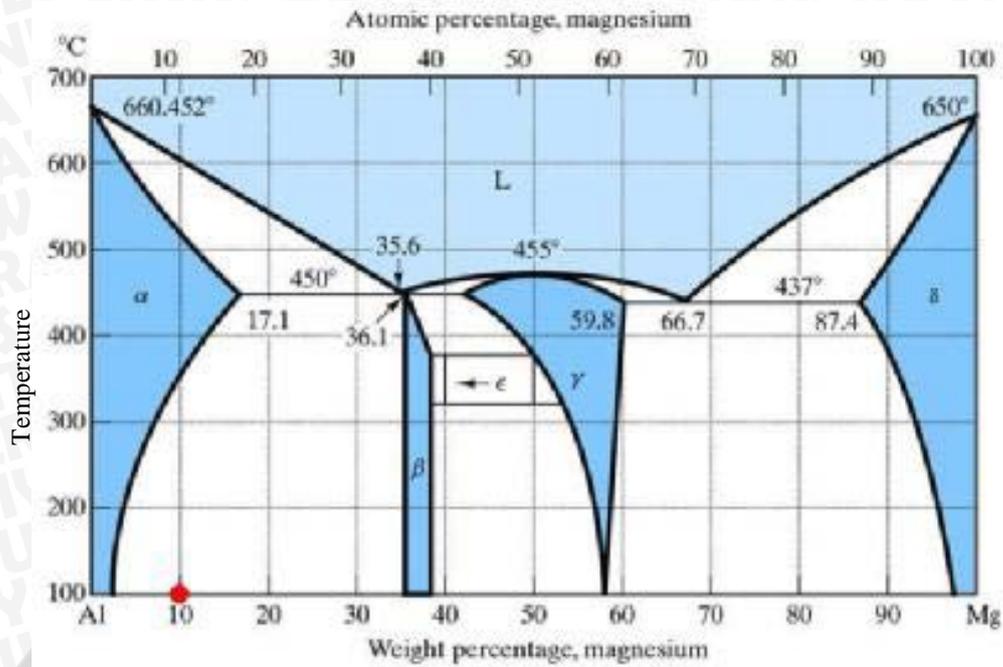
dengan larutan padat Al adalah larutan padat yang merupakan senyawa antar logam. Paduan dengan 2–3% Mg yang memiliki *formability* dan *forgeability* yang tinggi, paduan Al 5052 adalah paduan yang biasa dipakai sebagai bahan tempaan. Paduan Al 5052 adalah paduan yang paling kuat dalam sistem ini, dipakai setelah dikeraskan oleh pengerasan regangan apabila diperlukan kekerasan tinggi. Paduan Al 5083 yang dianil adalah paduan antara (4,5% Mg) kuat dan mudah dilas oleh karena itu, sekarang dipakai sebagai bahan untuk tangki LNG. Paduan Al – Mg mempunyai ketahanan korosi yang sangat baik, sejak lama disebut hidronalium dan dikenal sebagai paduan yang tahan korosi. Cu dan Fe sangat berbahaya bagi ketahanan korosi, terutama Cu sangat memberikan pengaruhnya maka perlu perhatian khusus terhadap tercampurnya unsur pengotor pada hasil coran. (Surdia, 1992). Unsur Magnesium memberikan pengaruh baik yaitu:

1. Mempermudah proses penuangan, karena sifat mampu alir yang baik
2. Meningkatkan dan mempermudah kemampuan pengerjaan mesin
3. Sifat daya tahan terhadap korosi yang cukup baik
4. Meningkatkan kekuatan mekanik
5. Menghaluskan butiran kristal secara efektif
6. Meningkatkan ketahanan beban kejut atau impact.

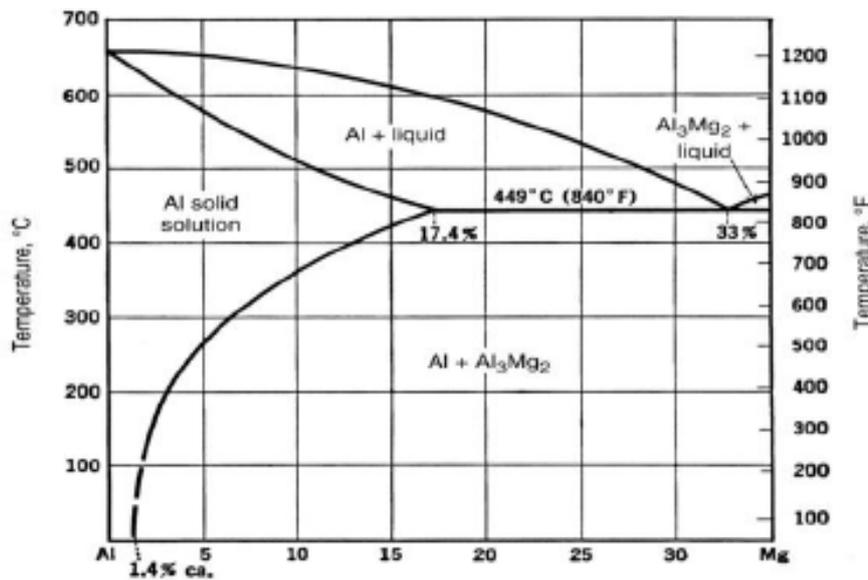
Pengaruh buruk yang ditimbulkan oleh unsur Mg:

1. Meningkatkan kemungkinan timbulnya cacat pada hasil coran

Diagram fase adalah grafik yang digunakan untuk menunjukkan kondisi kesetimbangan antara fase-fase yang berbeda dari suatu zat yang sama. Komponen komponen umum diagram fase adalah garis kesetimbangan yang merujuk pada garis yang menandakan terjadinya transisi antar fase. Titik *triple* adalah titik potong dari garis-garis kesetimbangan antara tiga fase benda, (padat, cair, dan gas). Solidus adalah temperatur di mana zat tersebut stabil dalam keadaan padat. Likuidus adalah temperatur di mana zat tersebut stabil dalam keadaan cair. Diagram fase paduan Al-Mg ditunjukkan sebagaimana pada gambar 2.1 dan 2.2



Gambar 2.1 Diagram Fase Paduan Al-Mg  
Sumber : ASM Handbook, 2004

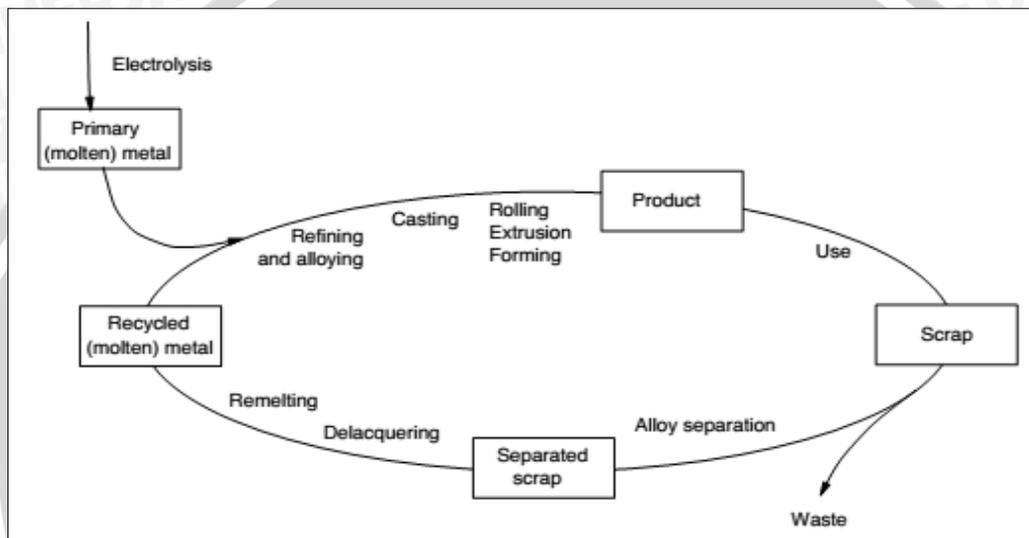


Gambar 2.2 Potongan Diagram Fase Al-Mg  
Sumber: ASM Handbook, 2004

Dari gambar 2.2 menunjukkan bahwa keberadaan magnesium hingga 15,35% dapat menurunkan titik lebur logam paduan yang cukup drastis, dari 660°C hingga 450°C. Namun, hal ini tidak membuat aluminium paduan dapat ditempa menggunakan panas dengan mudah karena korosi akan terjadi pada suhu di atas 600°C. Keberadaan magnesium juga menjadikan logam paduan dapat bekerja dengan baik pada temperatur yang sangat rendah, di mana kebanyakan logam akan mengalami *failure* pada temperatur tersebut.

### 2.2.3 Remelting Aluminium

*Remelting* adalah proses dimana suatu bahan bekas dilebur kembali menggunakan proses pengecoran logam untuk dijadikan bahan mentah atau *ingot* yang selanjutnya akan diproses kembali menjadi produk tertentu dalam proses manufaktur. *Remelting* aluminium hanya membutuhkan 5% dari energi yang dibutuhkan untuk memproduksi aluminium dari proses ekstraksi bijih bauksit (Farner, 2000). Karena setiap tahun banyaknya aluminium bekas meningkat, daur ulang aluminium sangat diperlukan untuk mengurangi adanya limbah yang bisa menyebabkan polusi di lingkungan sekitarnya.



Gambar 2.3 Siklus Aluminium  
Sumber : Farner, 2000:4

Pada dasarnya, proses *remelting* adalah proses peleburan dan penuangan kembali material yang sudah dilebur sebelumnya. *Remelting* merupakan salah satu siklus dari aluminium. Hal ini dikarenakan daya tahan aluminium sudah mencapai batas maksimal dari ketahanan lamanya yang kemudian tidak terpakai dan menjadi aluminium bekas, proses selanjutnya dalam siklus aluminium yaitu pemisahan antara yang layak dipakai dengan yang tidak. Yang layak dipakai akan menuju proses selanjutnya, yang tidak layak, akan dibuang (Farner,2000).

### 2.3 Pengulangan *Recycling*

Pengulangan *recycling* adalah pengulangan daur ulang yang dilakukan pada bahan bekas yang pengambilan bahan baku sebelum diproduksi dari metode sekunder, yaitu *recycling* itu sendiri. Pengulangan bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan metode

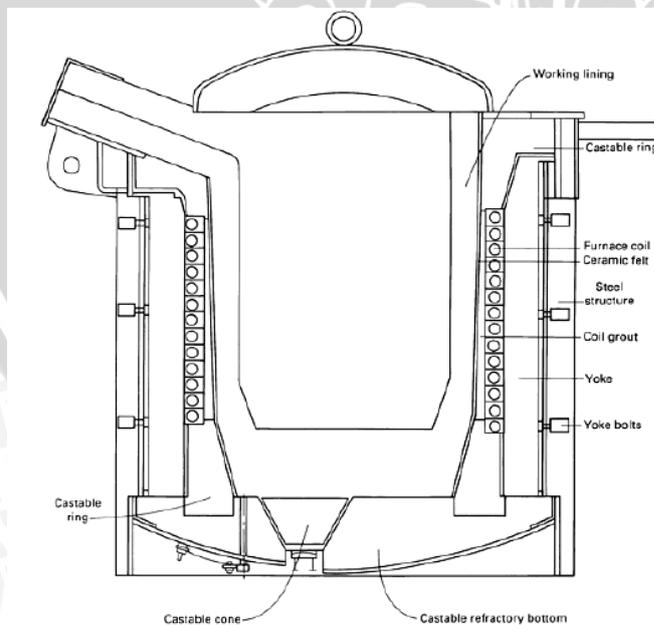
sekunder untuk pengambilan bahan. Sedangkan pengulangan ini dapat diulang kembali sampai tingkatan *recycling* tertentu.

## 2.4 Macam-macam Tungku

### 2.4.1 *Electrical Furnace*

*Electrical furnace* merupakan peralatan atau alat yang digunakan untuk proses pembuatan logam atau peleburan logam, dimana material dipanaskan dan dicairkan dengan busur listrik yang berasal dari elektroda ke material di dalam tanur. Ada 2 macam arus listrik yang bisa digunakan dalam proses peleburan dengan tungku ini, yaitu arus searah (*direct current*) dan arus bolak-balik (*alternating current*). Dan yang biasa digunakan dalam proses peleburan adalah arus bolak-balik dengan 3 fase menggunakan *electrode graphite*.

Salah satu kelebihan *electrical furnace* dari *basic oxygen furnace* adalah kemampuan untuk mengolah scrap menjadi 100% material cair. Kapasitas produksinya dapat mencapai 400 ton. *Electrical furnace* memiliki bentuk fisik yang cukup rendah sehingga dalam hal pengisian bahan baku sangat mudah. Dalam hal pengoperasiannya juga tidak terlalu sulit karena hanya memerlukan beberapa orang operator yang memantau proses peleburan dan penggunaan listrik pada dapur tersebut.



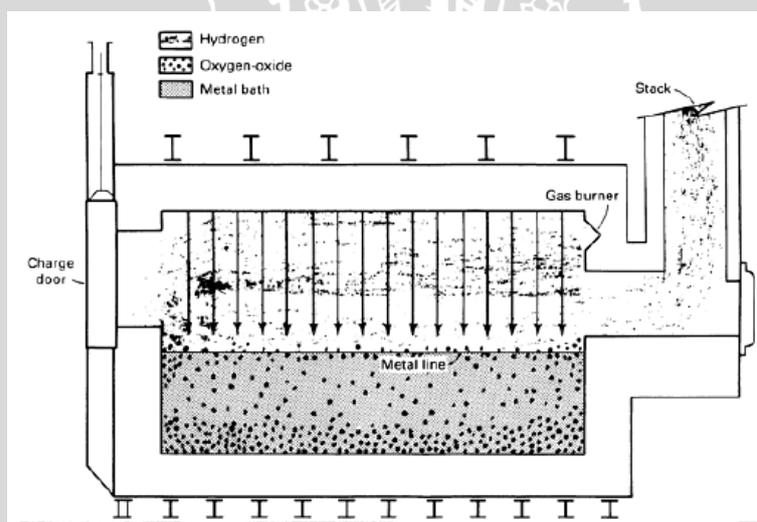
Gambar 2.4 *Induction Furnace*

Sumber : *ASM Handbook* Vol.15, 2002:802

### 2.4.2 Reverberatory Furnace

*Reverberatory Furnace* secara luas digunakan untuk meleburkan logam *non-ferrous* dan besi. *Reverberatory* merupakan jenis dapur dimana logam dilebur oleh panas dari pembakaran bahan bakar di salah satu ujung perapian, melewati bak atau wadah yang isinya logam yang dicairkan menuju tumpukan di ujung lain. Di dalam dapur *reverberatory* akan mengalami proses konveksi dan radiasi (panas dipantulkan) dari atap dan dinding-dinding samping. Kemudian gas buang (limbah panas) akan dikeluarkan melalui cerobong. Panas dengan cepat diserap oleh logam padat sehingga logam mencair dan kemudian mengalir dari perapian miring ke tempat penuangan.

*Reverberatory* berkonstruksi sederhana dan memiliki biaya yang relatif rendah sehingga membuat industri manufaktur masih mengandalkan untuk peleburan ingot secara massal dan juga untuk *recycling* aluminium. Dapur ini diproduksi dalam berbagai konfigurasi konstruksi yang tetap atau miring, persegi panjang atau silinder dengan kapasitas peleburan 200-1300 kg/jam.

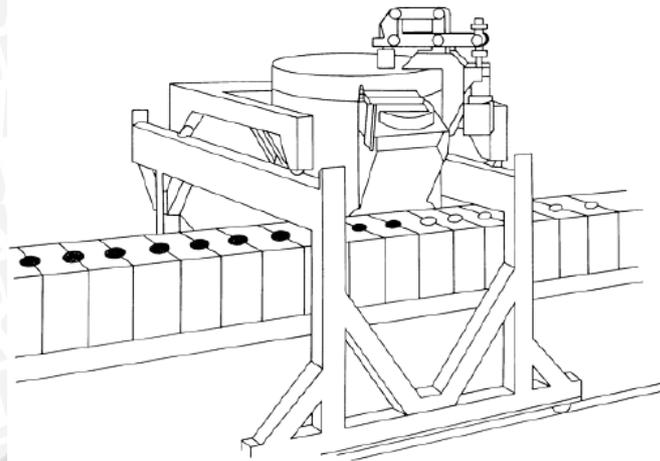


Gambar 2.5 Reverberatory Furnace

Sumber : ASM Handbook Vol.15, 2002:818

### 2.4.3 Automatic Pouring System

*Automatic Pouring System (APS)* adalah sistem penuangan logam cair dari tungku peleburan ke cetakan yang dikerjakan secara otomatis (tidak menggunakan ladle yang dikerjakan oleh manusia) yang telah banyak dilakukan untuk pengecoran cetak, dan pengecoran dengan cetakan logam bagi logam-logam yang titik cairnya rendah, tetapi tidak banyak dipergunakan untuk besi cor mengingat titik cairnya yang tinggi.



Gambar 2.6 *Furnace with Automatic Pouring System*

Sumber : *ASM Handbook* Vol.15, 2002:1085

## 2.5 Fluiditas

Secara umum, fluiditas adalah kondisi dimana logam cair yang mampu membuat logam cair mengalir melalui jalur cetakan dan mengisi semua celah cetakan. Fluiditas yang rendah mengarah pada cacat dan kegagalan pengecoran produk. Fluiditas tidak dapat diukur dari sifat fisik individual yang berbeda dengan densitas maupun viskositas, sehingga pengujian empiris dilakukan untuk mengukur semua karakteristik dan fluiditas logam cair dalam pengecoran dan pengukuran logam. Perhitungan nilai fluiditas juga dapat dihitung sesuai dengan persamaan berikut.

$$L_f = \frac{V \cdot k_m \cdot S^2}{16} \text{ to } \frac{V \cdot k_m \cdot S^2}{64} \quad (2-1)$$

dengan:

$L_f$  = Nilai Fluiditas

$v$  = Kecepatan aliran

$k_m$  = konstanta fluiditas

$S$  = Tebal karakteristik

Faktor-faktor yang mempengaruhi nilai fluiditas pada dasarnya terdiri dari sifat logam cair dan kondisi pengecoran. Intrinsik cairan terdiri atas viskositas, tegangan permukaan, karakteristik dari permukaan lapisan oksida pada permukaan, kandungan inklusi, dan komposisi material, sedangkan kondisi pengecoran terdiri dari faktor

diantaranya cetakan, desain cetakan, karakteristik permukaan cetakan, material cetakan, laju penuangan, dan pengukuran fisik dinamika fluida oleh sistem. Tetapi, diantara faktor itu pengaruh fluiditas pada umumnya dipengaruhi oleh komposisi dan temperatur.

#### 1. Viskositas

Viskositas adalah sebuah ukuran gaya yang diperlukan untuk memindahkan sebuah permukaan dari unit luasan. Pada saat logam cair mengalir pada sebuah saluran tertutup, viskositas akan menentukan alirannya, mana *drag* atau hambatan yang timbulkan dinding saluran tertransmisi ke logam cair, sehingga dapat mempengaruhi kecepatan aliran logam pada cetakan. Jadi semakin tinggi viskositasnya, maka fluiditasnya menurun. Sebaliknya, jika viskositas rendah maka fluiditasnya pun meningkat.

#### 2. Temperatur

Temperatur penuangan logam cair adalah faktor yang paling dominan dalam mempengaruhi fluiditas, sedangkan fluiditas dari logam paduan berhubungan dengan superheat semakin tinggi temperatur peleburan fluiditas cairan akan semakin tinggi.

#### 3. Komposisi

Komposisi dari logam cair juga merupakan parameter yang mempengaruhi fluiditas. Fluiditas tinggi umumnya terdapat pada logam cair murni komposisi kimia logam merupakan faktor besar yang mempengaruhi fluiditas. Setiap unsur paduan memiliki karakteristik yang berbeda beda diantaranya *silicon* yang dapat meningkatkan nilai fluiditas dari aluminium. Selain itu unsur besi dapat meningkatkan keuletan dari aluminium tetapi dapat menurunkan nilai fluiditas dari material tersebut (ASM Handbook Volume 15,1988).

#### 4. Inklusi

Disamping komposisi dari dasar paduan, karakteristik komposisi lain juga mempengaruhi sifat mampu alir atau fluiditas, yaitu inklusi pada logam cair. Inklusi tersebut, yang berada dalam bentuk partikel *suspended insoluble nonmetallic particle*, yang dapat menurunkan fluiditas aluminium cair secara signifikan. Ada beberapa macam bentuk inklusi yang mungkin terdapat pada paduan aluminium cair diantaranya yaitu: oksida ( $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ), intermetalik ( $MnAl_3$ ,  $FeAl_3$ ), dan inklusi dari refraktori (senyawa oksida dan karbida besi, silikon, maupun aluminium). Diantara inklusi itu inklusi oksida adalah inklusi yang memungkinkan paling banyak terjadi.

### 2.5.1 Hidrodinamika Logam Cair

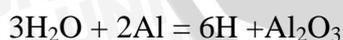
Hidrodinamika logam cair adalah pergerakan aliran logam cair. Pergerakan logam cair tersebut bergerak setelah meleburnya semua material aluminium *silicon* dan menghaikan paduan yang diinginkan. Setelah paduan tersebut tercampur dengan sempurna, maka dilakukan ke tahap penuangan dari tungku ke cetakan yang sudah disediakan. Hal ini bisa mengakibatkan dampak buruk terhadap hasil coran. Porositas merupakan cacat hasil coran yang sering dihasilkan pada proses pengecoran.

Faktor kecepatan saat proses penuangan menjadi salah satu faktor yang penting untuk menghasilkan hasil coran yang baik. Cepat atau lambatnya saat proses penuangan mempengaruhi hasil coran. Hal ini dikarenakan jika logam cair terlalu lama saat penuangan, maka bisa menyebabkan banyaknya logam cair yang teroksidasi dan hasil coran yang kurang maksimal karena banyak udara yang terperangkap dan menyebabkan porositas didalamnya.

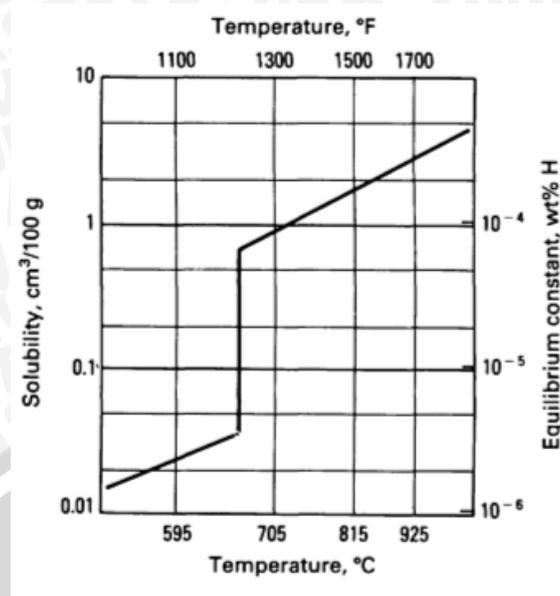
### 2.6 Kelarutan Gas

Pada proses pengecoran aluminium dan paduannya, sering kali gas-gas hidrogen, oksigen, dan nitrogen terlarut karena adanya fenomena difusi. Variasi kelarutan gas-gas tersebut secara langsung dipengaruhi oleh temperatur. Cacat dari Aluminium dapat bertambah dengan meningkatnya kelarutan gas dalam *liquidus* dari peleburan menuju solidifikasi. Kontrol dalam kondisi lebur dan perlakuan lebur dapat mengurangi tingkat kelarutan gas (Suprpto, 2012).

Dalam kondisi *melt* atau meleleh, aluminium dan paduannya sangat mudah menyerap hidrogen karena temperatur kelarutannya yang tinggi. Pada peleburan aluminium ini, hanya sedikit hidrogen yang diserap dari atmosfer. Sumber utama hidrogen di dalam Aluminium adalah uap air, uap panas, atau hasil dari reaksi kimia sebagai berikut:



Kemudian grafik di bawah ini menjelaskan bagaimana cepatnya kandungan hidrogen yang naik ketika temperatur logam Aluminium cair meningkat. Paduan yang mengandung hidrogen  $\pm 0,01\text{cm}^3/100$  gram relatif kecil porositasnya.



Gambar 2.7 Pengaruh temperatur terhadap kelarutan hidrogen dalam aluminium  
Sumber : ASM Handbook Vol. 15, 2002

## 2.7 Solidifikasi

Solidifikasi (pembekuan) adalah perubahan transformasi logam cair ke bentuk padatnya. Pembekuan logam merupakan salah satu tahapan yang penting dalam proses pengecoran. Dalam proses solidifikasi laju pendinginan berpengaruh terhadap pembentukan struktur butir dan dapat mempengaruhi sifat mekanik dari logam.

Seluruh logam saat proses pembekuan membentuk kristal, susunan teratur (*ordered*) dan atom-atom berulang (*repetitive*) dalam suatu ruang. Saat akan mulai membeku, atom-atom mulai menyusun diri dalam suatu struktur ruang. Susunan awal atom dikenal dengan sebutan inti atom dan proses pembentukan inti atom disebut pengintian (*crystallization*). Setelah terbentuk inti atom, atom-atom lainnya yang terdapat disekitarnya akan mengikuti inti tersebut, sehingga seolah-olah inti atom berkembang dan memiliki cabang-cabang yang dikenal dengan sebutan *dendrite*.

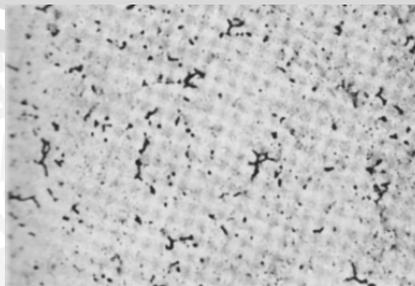
Pada proses pengintian akan timbul banyak inti atom sehingga banyak pula muncul *dendrite*, masing-masing mempunyai arah atau orientasi yang berbeda. Dendrit akan berkembang lebih besar sehingga nantinya akan menyinggung *dendrite-dendrite* lain yang berkembang. Permukaan yang bersinggungan ini dikenal dengan sebutan batas butir (*grain boundary*), sedangkan kristal yang dibatasi oleh batas butir dikenal dengan sebutan butir.

## 2.8 Observasi dengan Metalografi

Metalografi adalah ilmu untuk memeriksa dan menganalisa suatu struktur maupun morfologi dari logam, paduan, maupun material lainnya (yang kadang disebut juga materialografi). Sebelum dilakukan pemeriksaan atau observasi, dilakukan preparasi yang urutannya secara sistematis sebagai berikut :

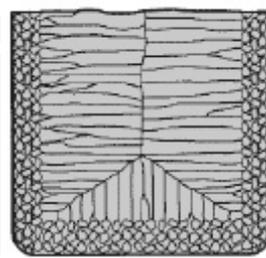
1. *Sampling position* (proses pengambilan sampel)
2. *Cutting* (pemotongan sampel)
3. *Mounting* (pemegangan sampel)
4. *Grinding* (pengasahan sampel)
5. *Washing* (pencucian sampel dari sisa pengasahan)
6. *Polishing* (pemolesan sampel)
7. *Washing* (pencucian sampel dari sisa pemolesan)
8. *Drying* (pengeringan sampel)
9. *Etching* (pengetsaan sampel)
10. *Drying* (pengeringan sampel)
11. Observasi secara mikroskopis atau makroskopis

Pemeriksaan pada struktur material bisa dilakukan dengan berbagai macam perbesaran, dari yang kecil mencapai 20x sampai lebih dari 1.000.000x untuk perbesaran mikronya. Sedangkan cara untuk pemeriksaan dengan perbesaran makro, digunakan kaca pembesar maupun mikroskop cahaya untuk mencapai perbesaran sampai 50x, yang bertujuan untuk melihat morfologi suatu permukaan benda yang diobservasi. Sedangkan untuk pemeriksaan dengan perbesaran mikro, digunakan mikroskop cahaya atau mikroskop elektron untuk melihat perbesaran sampai 1.000.000x yang bertujuan untuk melihat struktur mikronya (ASM Handbook Vol. 9, 2004). Pengamatan struktur mikro adalah salah satu cara untuk mengetahui struktur kristal dalam coran sehingga kita dapat mengetahui sifat fisis dari coran tersebut.

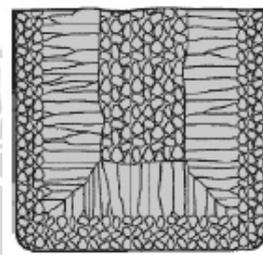


Gambar 2.8 Struktur mikro hasil coran paduan Al-Mg (100x)  
Sumber : Surdia dan Chijiwa, 1975

Pada gambar 2.8 merupakan gambar struktur mikro paduan Al-Mg . Matriks adalah  $\alpha$ -Al, titik hitam adalah MgSi dengan komposisi ; Mg 3,86%; Si 0,18%; Mn 0,39 %; Fe 0,29%; Cu 0,07%; Al sisanya. Paduan aluminium yang mengandung magnesium sekitar 4% atau 10% mempunyai ketahanan korosi dan sifat-sifat mekanis yang baik. Mempunyai kekuatan tarik diatas 30 Kg/mm<sup>2</sup> dan perpanjangan diatas 12% setelah perlakuan panas. Paduan ini disebut hidronalium dan dipakai untuk bagian-bagian dari alat-alat industri kimia, kapal laut, kapal terbang, dan sebagainya yang membutuhkan ketahanan korosi, (Surdia, dan Chijiwa 1975). Pada proses solidifikasi juga terjadi pembentukan struktur butir maupun serat (*grain structure*.)



Gambar 2.9 Struktur Logam Tuang Murni  
Sumber : Groover, 2002



Gambar 2.10 Struktur Logam Tuang Paduan  
Sumber : Groover, 2002

Gambar 2.9 dan 2.10 diatas menunjukkan struktur butiran dari logam murni dan logam paduan. Struktur dari logam hasil penuangan memiliki kulit atau cangkang yang terbentuk karena pendinginan cepat. Hal ini karena dinding cetakan berada pada suhu ruang atau lebih dingin daripada suhu logam cair. Pendinginan cepat pada kulit coran ini menghasilkan struktur yang halus dan terlihat acak. Proses pendinginan berlanjut dan membentuk serat (*grain*) yang berkembang menuju bagian tengah dari coran. Arah pembentukan serat ini berlawanan dengan arah perpindahan panas. Arah perpindahan panas (*heat transfer*) dari dalam menuju ke luar atau cetakan, sedangkan arah pembentukan serat dari sisi paling tepi coran menuju ke dalam coran. Pembentukan *grain*

ke dalam terlihat seperti duri atau tulang dari logam padat. Struktur yang terdapat pada logam murni (gambar 2.9) membentuk cabang pada tengah-tengah logam dan disebut *columnar grains*.

Sedangkan struktur butiran pada logam paduan (lihat gambar 2.10) terbentuk secara terpisah. Hal ini terjadi karena komposisi logam paduan yang tidak seimbang. Komposisi yang tidak seimbang tersebut dinyatakan dalam hasil akhir pengecoran berupa pemisahan (*segregation*) elemen. Pemisahan yang terjadi pada logam paduan dapat disebut sebagai *ingot segregation*. Sifat mekanis dari *cast* paduan aluminium ditentukan oleh struktur mikronya. Semakin baik struktur mikronya, maka semakin baik pula sifat-sifat mekanisnya. Jika ukuran butirnya kecil, bidang kontak antar batas butir akan meningkat, yang menyebabkan sifat mekanis seperti kekuatan tarik, kekerasan, dan kekuatan tekannya meningkat. Sedangkan jika ukuran butirannya besar, bidang kontak antar batas butir menurun, dan sifat mekanis seperti *ductility*, ketahanan fatik, dan kekuatan *impact*-nya meningkat. Struktur mikro dari *cast* paduan aluminium dipengaruhi oleh komposisi, kecepatan pembekuan, dan perlakuan panasnya. Sedangkan bagian-bagian dari struktur mikro yang mempengaruhi sifat mekanis *cast* aluminium adalah :

1. Inklusi, ukuran, bentuk dan pendistribusian fase intermetalik
2. Ukuran dan bentuk butir serta *dendrit arm spacing* (DAS)

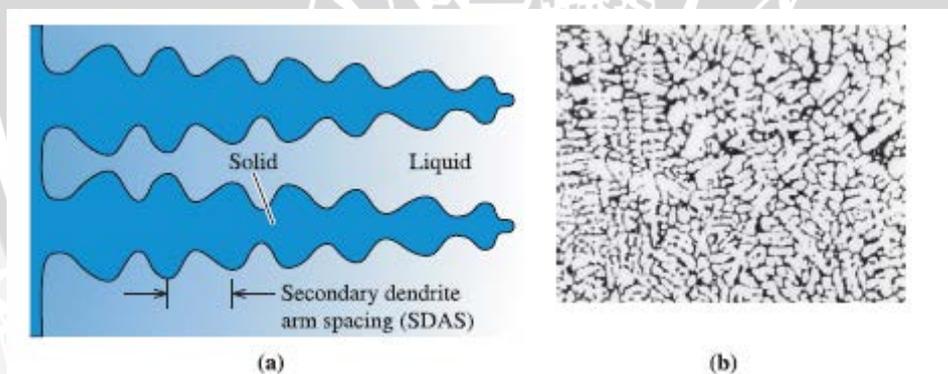
### 2.8.1 Inklusi dan Fase Intermetalik

Inklusi adalah pengotor yang tidak diinginkan dan salah satunya terdapat dalam paduan aluminium tuang. Umumnya, inklusi yang terdapat pada logam cair aluminium adalah oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ) dan karbida ( $\text{Al}_3\text{C}_4$ ,  $\text{TiC}$ ). Keberadaan inklusi dapat menimbulkan masalah terhadap sifat-sifat *cast* paduan aluminium seperti menyulitkan proses *machining*, mengurangi kekuatan dan ketahanan terhadap *fatigue* hingga meningkatkan porositas dan meningkatkan korosi.

Salah satu faktor yang mempengaruhi ukuran, bentuk dan distribusi fase intermetalik adalah kecepatan pembekuan. Pembekuan dengan kecepatan lambat akan menghasilkan bentuk fase intermetalik yang kasar dan terjadinya konsentrasi fase pada kedua batas butir. Sebaliknya, dengan kecepatan pembekuan yang cepat akan menghasilkan partikel yang lebih halus (butiran yang kecil) dan menyebar (*dispersed*) secara merata.

### 2.8.2 Dendrite Arm Spacing

Mekanisme pembekuan dendrit dapat dijelaskan dengan teori pembekuan (*solidify*). Teori ini menyatakan bahwa selama proses pembekuan, terjadi perubahan fase cair menjadi padat, logam akan terkristalisasi sehingga atom-atom menyusun diri dalam keteraturannya. Proses kristalisasi ini dimulai dari proses pengintian (*nucleation*). Biasanya struktur yang terbentuk pada proses pengecoran logam adalah kolumnar dan *equiaxed*. Struktur kolumnar adalah struktur butir hasil pengecoran logam cair dimana berbentuk memanjang dengan arah yang sama sebagai hasil dari proses pembekuan. Struktur ini biasanya terjadi pada bagian yang bersentuhan dengan dinding cetakan. Sedangkan struktur *equiaxed* adalah suatu struktur butir hasil pengecoran dimana sering ditemukan pada bagian tengah, dimana daerah ini mempunyai arah butir yang berbeda satu dengan yang lainnya. Hal ini dikarenakan bahwa proses pembentukan nuklei terjadi secara menyebar. Mekanisme pembentukan struktur kolumnar dan *equiaxed* dapat dilihat pada Gambar 2.11. Tak selamanya proses kristalisasi menghasilkan kolumnar ataupun *equiaxed*. Tak jarang bentuk dendrit ditemukan pada hasil pengecoran. dendrit merupakan suatu struktur khas pada hasil pengecoran dimana berbentuk seperti pohon cemara yang tumbuh dalam keadaan *undercooled*.

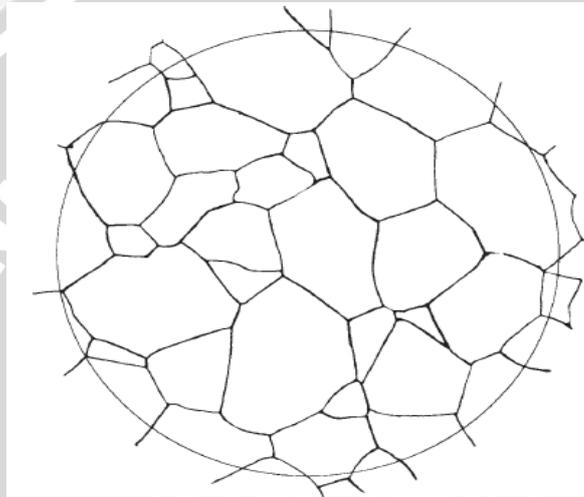


Gambar 2.11 (a) *Secondary DAS*; (b) Dendrit aluminium paduan pembesaran 50x  
Sumber : *ASM Handbook*, Vol. 9, 1985

*Deandrite arm spacing* DAS sangat dipengaruhi oleh kecepatan proses pembekuan logam cair. DAS juga mempengaruhi sifat mekanis suatu logam aduan terkait dengan struktur mikronya. Semakin besar nilai DAS maka akan semakin kasar struktur mikro paduan tersebut dan mengakibatkan menurunnya sifat mekanis. Sebaliknya nilai DAS yang lebih kecil mengindikasikan bahwa paduan tersebut mempunyai struktur mikro yang halus dan akan meningkatkan sifat mekanis paduan tersebut.

### 2.8.3 Perhitungan Diameter Butir

Ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk mengukur diameter butir dari struktur mikro suatu material salah satunya adalah metode Planimetri yang dikembangkan oleh Jeffries. Dimana metode ini cukup sederhana untuk menentukan jumlah butir persatuan luas pada bagian bidang yang dapat dihubungkan pada standar ukuran butir ASTM E 112 seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.12 Metode planimetri ini melibatkan jumlah butir yang terdapat dalam suatu area tertentu yang dinotasikan dengan  $N_A$ . Secara skematis proses perhitungan menggunakan metode ini yaitu sebagai berikut:



Gambar 2.12 Perhitungan Butiran Dengan Metode Planimetri  
Sumber : ASTM E112-96, 2004

Jumlah butir bagian dalam lingkaran ( $N_{\text{inside}}$ ) ditambah setengah jumlah butir yang bersinggungan ( $N_{\text{intercepted}}$ ) dengan lingkaran dikalikan oleh pengali Jeffries ( $f$ ).

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

dengan :

$N_A$  : Jumlah butir dalam area (butir/mm<sup>2</sup>)

$N_{\text{inside}}$  : jumlah butir bagian dalam lingkaran

$N_{\text{intercept}}$  : jumlah butir yang bersinggungan dengan lingkaran

$f$  : faktor pengali Jeffries

Kemudian untuk menentukan ukuran diameter butir digunakan persamaan ASTM E-112

$$G = \{3.322 (\log N_A) - 2.954\} \quad (2-3)$$

dimana :  $G$  = ASTM grain size number

Tabel 2.3 Pengali Jeffries

Pembesaran	Pengali Jeffries( f) untuk menentukan butiran/mm <sup>2</sup>
10	0.02
25	0.125
50	0.5
75	1.125
100	2
150	4.5
200	8
500	50
1000	200

Sumber : ASTM E 112-96, 2004

Semakin besar *grain size number*, semakin kecil ukuran butir, semakin tinggi tegangan tarik dan kekerasan. Sebaliknya, semakin kecil *grain size number*, semakin besar ukuran butir, semakin tinggi kekuatan *impact* dan ketahanan fatik.

## 2.9 Kekuatan Tarik

Kekuatan Tarik (*Tensile Strength*) adalah pemberian gaya atau beban terhadap suatu benda atau spesimen dengan gaya segaris berlawanan arah. Kekuatan tarik merupakan kemampuan bahan untuk menerima beban tarik tanpa mengalami kegagalan dan dinyatakan sebagai tegangan maksimal sebelum patah.

Pengujian tarik ditujukan untuk menentukan unit *tensile strength* dan *ductility* dari suatu material. Dalam pengujian ini dimana spesimen yang dijepit kedua ujungnya kemudian diberikan pembebanan tarik yang semakin lama semakin besar oleh kekuatan mekanik dari sistem hidrolik alat uji tarik hingga spesimen patah. Perubahan panjang pada spesimen yang disebabkan karena pembebanan tarik dan besarnya kekuatan tarik dapat diukur oleh sebuah alat ukur.

Tegangan tarik didefinisikan sebagai distribusi tegang tarik persatuan luas penampang bahan, yang dirumuskan :

$$\sigma = F/A \quad (2-4)$$

dengan :

$\sigma$  = Tegangan tarik (N/m<sup>2</sup>)

F = Beban tarik (N)

A = Luas penampang (A)

Sedangkan regangan dirumuskan dengan :

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \quad (2-5)$$

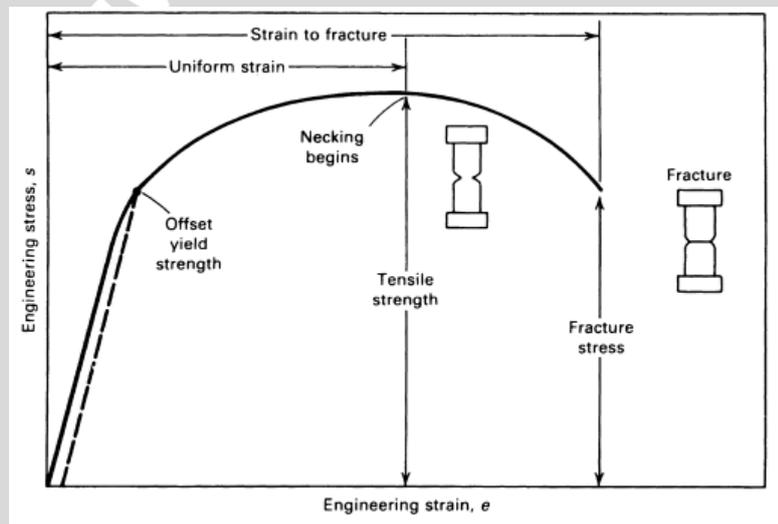
dengan :

$\varepsilon$  = Regangan

$\Delta L$  = Pertambahan panjang (m)

$L_0$  = Panjang awal (m)

Hubungan tegangan dan regangan dapat diketahui dengan jelas pada diagram tegangan regangan yang didasarkan dari data yang diperoleh dari pengujian tarik.



Gambar 2.7 Rekayasa Kurva Tegangan-Regangan

Sumber : Davis 2004:21

Dari gambar di atas dapat kita ketahui bahwa karakteristik kekuatan tarik itu memberikan suatu data dari pengujian tarik yang diantaranya:

#### 1. Tegangan *Yield*

Tegangan dimana terjadinya perpanjangan regangan tanpa adanya penambahan beban. Cara mencarinya dengan metode *offset*, yaitu memberikan garis sejajar dengan garis linier dari daerah elastis (tidak terjadi deformasi permanen) yang diberi jarak antara keduanya 0,2% dari regangan maksimal. Maka garis yang berpotongan itu yang disebut *yield point*. Titik *yield* ini yang menunjukkan dimulainya deformasi plastis sampai spesimen tersebut patah.

2. Tegangan *Ultimate*

Tegangan puncak atau tertinggi dari spesimen uji tersebut.

3. Tegangan *Fracture*

Tegangan akhir atau disebut juga tegangan saat spesimen uji mengalami kegagalan (*failure*).

4. Regangan Maksimal

Rasio dari pembagian pertambahan panjang tiap panjang awalnya yang mewakili pertambahan panjang spesimen uji tersebut.

## 2.10 Kesetimbangan Massa

Istilah kesetimbangan massa berasal dari kata “*mass equilibrium*”. Perhitungan kesetimbangan massa dikembangkan dengan cara merunut jumlah bahan yang masuk (*inflow*) dan jumlah bahan yang keluar (*outflow*) dari suatu proses dengan cara menghitung jumlah satuan semua bahan yang digunakan bersama jumlah satuan produk yang dihasilkan, yang tertahan dalam sistem, dan yang terbuang maupun masuk selama proses berlangsung. Prosedur perhitungan kesetimbangan massa sangat berguna antara lain untuk mengetahui formulasi bahan dan komposisi produk yang dihasilkan dari suatu proses pencampuran ataupun pengolahan bahan.

Kesetimbangan massa didasarkan pada prinsip dari hukum kekekalan massa yaitu “massa tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan”. Jadi di dalam suatu sistem pengolahan jumlah massa bahan yang memasuki sistem harus sama dengan jumlah massa bahan yang meninggalkan sistem ditambah dengan jumlah massa bahan yang mungkin tertinggal dalam instalasi berupa penumpukan (*accumulation*) dan inklusi yang bisa terjadi saat proses peleburan dan penuangan dari gas maupun kotoran yang mungkin ikut masuk. Atas dasar inilah maka diberlakukan ketentuan sederhana yaitu “apa yang masuk harus sama dengan apa yang keluar” (Mursalin, 2014).

### 2.10.1 *Yield Casting*

Dalam proses pengecoran logam terdapat efisiensi pengecoran logam atau disebut juga *yield casting* yang menyatakan perbandingan antara massa logam cair yang telah dituang ke dalam cetakan dengan logam yang menjadi terak maupun yang tertinggal dalam sistem. Banchhor et al. (2014) menyatakan bahwa jika semakin tinggi *yield casting* dari hasil proses pengecoran dapat memperbaiki *output rati* dari logam, hemat energi dan bahan baku, dan meningkatkan nilai produksi.

Untuk kesetimbangan massa (*mass equilibrium*) ini dapat dirumuskan menjadi persamaan berikut:

$$m_{input} = m_{product} + m_{dross} + m_{lost} \quad (2-6)$$

dengan:

$m_{input}$  = massa yang masuk sistem

$m_{product}$  = massa logam cair yang dituang

$m_{dross}$  = massa terak

$m_{lost}$  = massa yang hilang

Sedangkan untuk menyatakan efisiensinya dari *yield casting* yaitu:

$$\eta_{yield\ cast} = (Casting\ Weight / Pouring\ Weight) \times 100\% \quad (2-7)$$

dengan:

$\eta_{n\ yield\ cast}$  = massa logam cair yang dituang pada tingkat *recycling*  
(Shruthi, 2014)

## 2.11 Hipotesa

Berdasarkan tinjauan pustaka yang mendukung di atas maka dapat diambil hipotesa bahwa pada proses daur ulang (*recycling*) aluminium struktur menggunakan *electrical furnace* dapat meminimalisir adanya perubahan komposisi dari paduan aluminium yang dapat mempengaruhi sifat mekanik salah satunya kekuatan tarik dari benda hasil coran agar tidak terjadi penurunan yang drastis dibanding pada tungku peleburan lain. Tetapi, semakin banyak tingkat pengulangan *recycling* tersebut, semakin banyak terbentuknya fase intermetalik akibat unsur-unsur yang berreaksi dengan oksida yang menyebabkan penurunan *yield casting* dan penurunan kekuatan tarik.

## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Jenis Penelitian

Pada penelitian ini digunakan metode eksperimental dengan media alat dimana dengan secara langsung mengetahui sejauh mana pengaruh tingkat *recycling* (daur ulang) terhadap kekuatan tarik dan kesetimbangan massa dari ingot Aluminium struktur pada proses pengecoran *Electrical Furnace* dengan tujuan menyediakan *ingot* (bahan baku) untuk proses pengecoran, penempaan, permesinan, maupun *roll forming* yang diharapkan memiliki sifat mampu mesin, mampu tempa, mampu cor, dan mampu bentuk yang baik.

#### 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan pada Oktober 2015 sampai dengan Desember 2015 dengan proses *remelting* dilakukan di Laboratorium  $\alpha \beta \gamma$  Landungsari Malang, pengujian tarik dilakukan di Laboratorium Struktur - Universitas Negeri Malang, dan foto makrostruktur dan mikrostruktur dilakukan di Laboratorium Metalurgi Fisik – Universitas Brawijaya.

#### 3.3 Variabel Penelitian

Variabel Penelitian menyatakan sebuah nilai atau suatu sifat dari objek, individu ataupun kegiatan yang mempunyai banyak variasi tertentu antara satu dan lainnya yang telah ditentukan oleh peneliti untuk dipelajari dan dicari informasinya serta ditarik kesimpulannya. Terdapat tiga variabel dalam penelitian ini, diantaranya variabel bebas, variabel terikat, variabel terkontrol.

##### 3.3.1 Variabel Bebas

Variabel Bebas adalah variabel yang menyebabkan atau mempengaruhi, yaitu faktor-faktor yang diukur, dimanipulasi atau dipilih oleh peneliti untuk menentukan hubungan antara fenomena yang diobservasi atau diamati. Variabel bebas pada penelitian ini adalah tingkat *recycling* dengan proses pengecoran logam menggunakan *Electrical Furnace*.

### 3.3.2 Variabel Terikat

Variabel Terikat adalah faktor-faktor yang diobservasi dan diukur untuk menentukan adanya pengaruh variabel bebas, yaitu faktor yang muncul, atau berubah sesuai dengan diperkenalkan oleh peneliti. Variabel terikat dari penelitian ini adalah nilai perbandingan massa dan kekuatan tarik dari setiap hasil tingkatan *recycling*.

### 3.3.3 Variabel Terkontrol

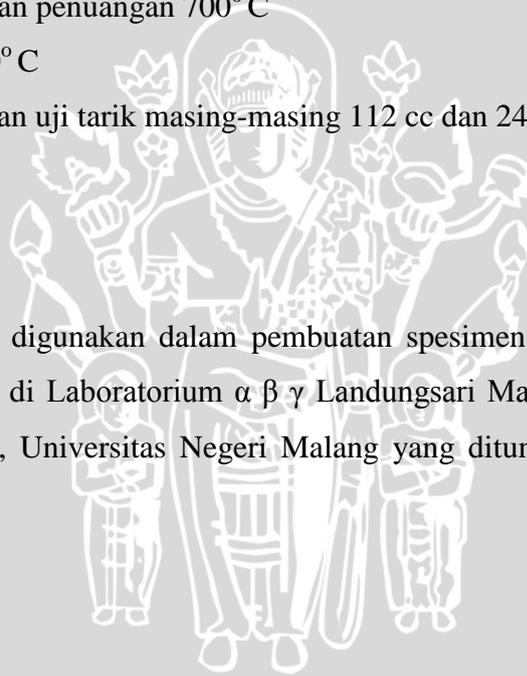
Variabel Terkontrol adalah variabel yang diusahakan untuk tetap terjaga, dikendalikan dan diusahakan untuk dinetralisasi oleh peneliti. Variabel yang dikontrol dalam penelitian ini adalah :

1. Bahan baku 11 kg Aluminium struktur
2. Temperatur peleburan dan penuangan 700° C
3. Temperatur cetakan 100° C
4. Volume cetakan *ingot* dan uji tarik masing-masing 112 cc dan 24,45 cc

## 3.4 Persiapan Penelitian

### 3.4.1 Alat

Adapun peralatan yang digunakan dalam pembuatan spesimen melalui proses pengecoran *Electrical Furnace* di Laboratorium  $\alpha \beta \gamma$  Landungsari Malang, pengujian tarik di Laboratorium Struktur, Universitas Negeri Malang yang ditunjukkan melalui gambar-gambar berikut ini:





Gambar 3.1 Alat-Alat yang digunakan

Sumber : Laboratorium  $\alpha \beta \gamma$  Landungsari, Malang

Keterangan gambar:

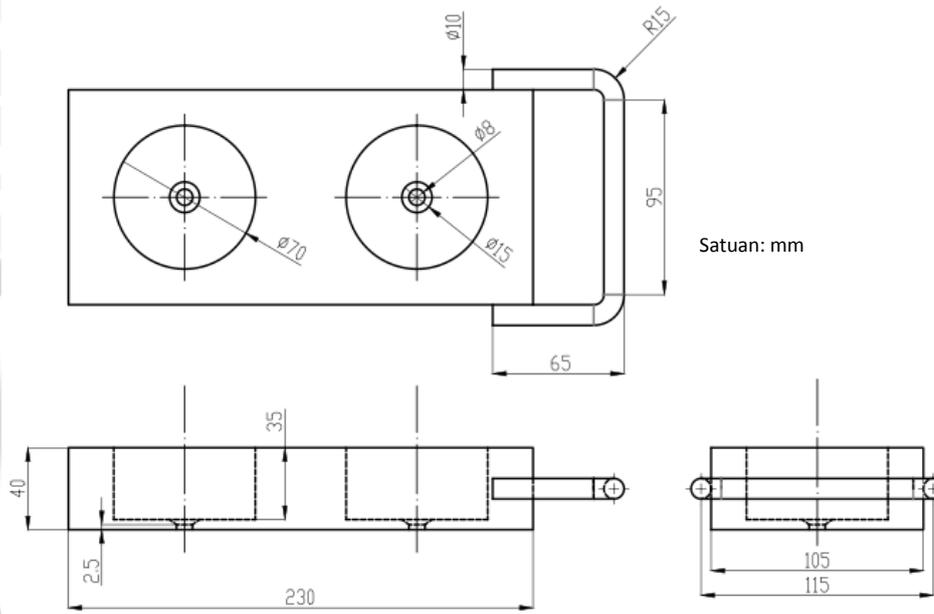
- (a) Timbangan elektrik dengan kapasitas 0 – 10000 gram (ketelitian 0,01)  
Untuk menimbang produk (*ingot* dan spesimen) dan *dross* setelah pengecoran dari tiap-tiap *recycling*.
- (b) Tungku peleburan elektrik dengan spesifikasi :
- Sumber panas = Arus listrik
  - Daya =  $I.V.\cos\phi = 11,8 \cdot 220 \cdot 0,85 = 2206,6 \text{ W}$
  - Arus = 11,8 A
  - Tegangan = 220 V
  - Kapasitas =  $\pm 2 \text{ kg}$
- (c) *Thermogun*  
Untuk sensor penunjuk temperatur melalui titik laser yang ditembakkan.
- (d) Sarung Tangan Tahan Panas  
Sebagai salah satu *safety gear* saat memegang benda yang panas.

(e) *Ladle*

Alat untuk memisahkan *dross* dengan logam cair saat sebelum penuangan berlangsung.

(f) Cetakan permanen untuk *ingot*

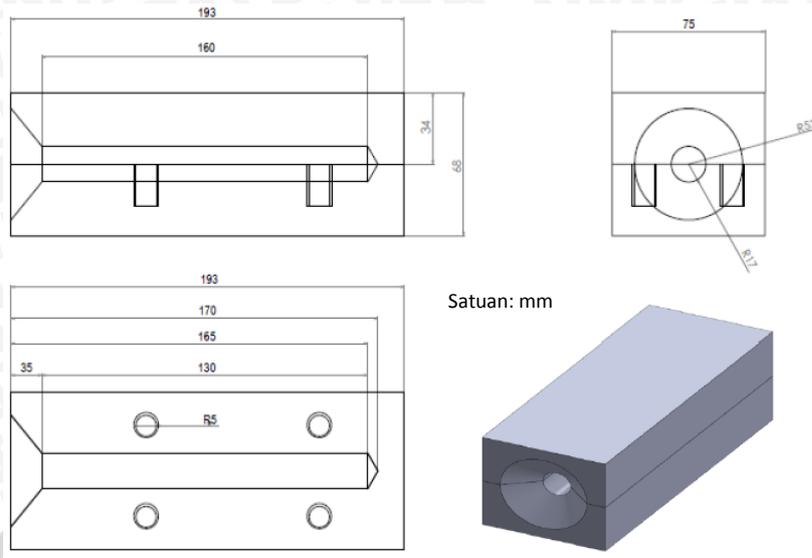
Cetakan permanen untuk *ingot* berbentuk silinder. Cetakan disediakan berjumlah 2 buah untuk menghasilkan maksimal 4 buah *ingot*. Berikut dimensi dari cetakan permanen ini.



Gambar 3.2 Dimensi Cetakan Permanen *Ingot*

## (g) Cetakan permanen untuk spesimen uji tarik

Cetakan permanen menghasilkan spesimen berbentuk silinder pejal. Cetakan disediakan 2 buah untuk menghasilkan maksimal 2 buah spesimen, dengan dimensi seperti gambar berikut.



Gambar 3.3 Dimensi Cetakan Spesimen Uji Tarik

(h) *Universal Testing Machine*



Gambar 3.4 *Universal Testing Machine*

Sumber : Laboratorium Struktur, Teknik Sipil, Universitas Negeri Malang

Mesin ini lebih banyak digunakan untuk pengujian tarik dengan spesifikasi :

- Produksi = Kai Wei
- Kapasitas beban maksimal = 1000 kN
- Resolusi = 0,1 kN

### 3.4.2 Bahan

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian kali ini untuk membuat *ingot* dari Aluminium struktur ditunjukkan seperti gambar berikut ini:

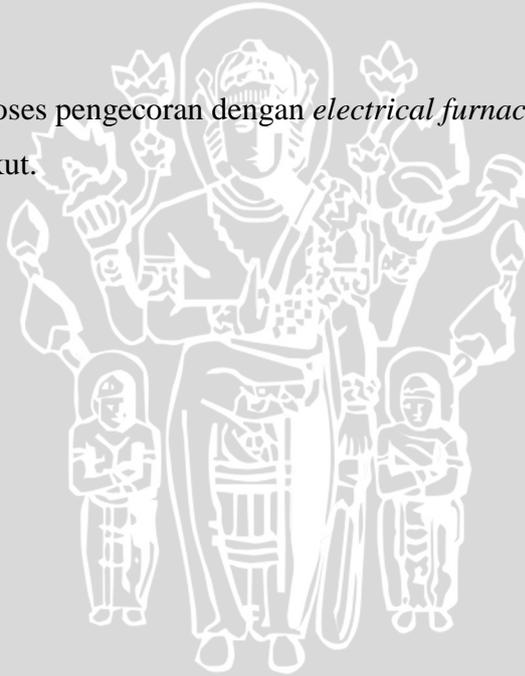


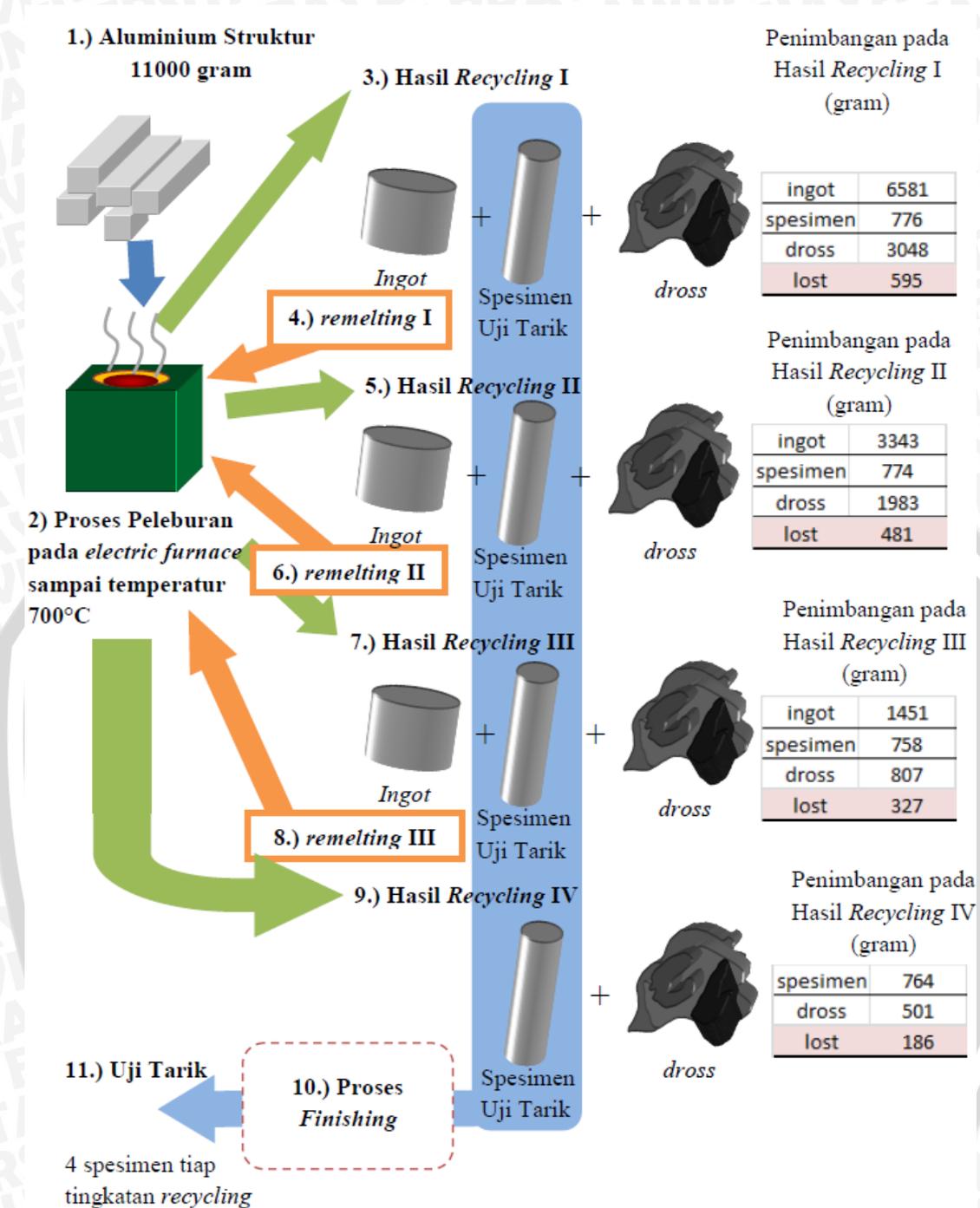
Gambar 3.5 Potongan-Potongan Aluminium Struktur

Sumber : Dokumentasi Pribadi

### 3.5 Skema Penelitian

Skema Instalasi pada proses pengecoran dengan *electrical furnace* bisa digambarkan pada gambar berikut.





Gambar 3.6 Skema Peneleitian

### 3.6 Prosedur Penelitian

#### 3.6.1 Pembuatan Spesimen dan Pengujiannya

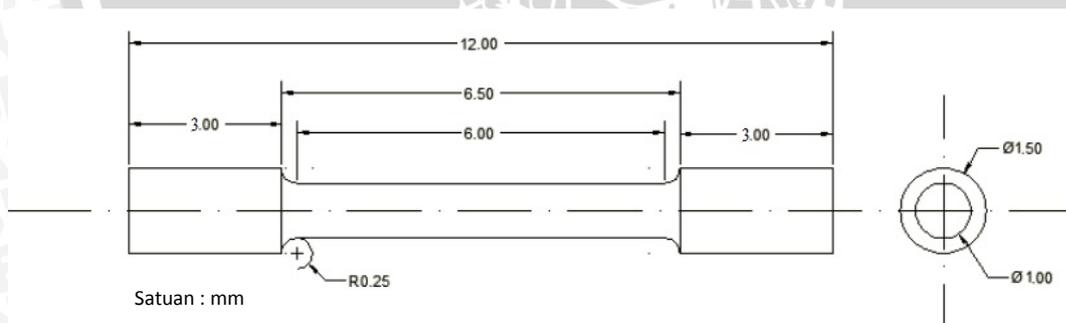
1. Potongan-potongan Aluminium struktur dipreparasi terlebih dahulu.
2. Memasukkan bahan baku ke dalam tungku listrik dan dilebur sampai temperatur 700° C.
3. Selanjutnya melakukan pemanasan terhadap cetakan sampai suhu 100° C.

4. Setelah dilebur sesuai dengan waktu yang telah ditentukan, dilakukan pemisahan antara *dross* (terak) dengan logam cair agar penuangan logam cair tidak terhambat.
5. Kemudian dilakukan penuangan logam cair ke dalam cetakan permanen yang sudah disiapkan.
6. Setelah penuangan, tunggu sampai produk memadat dan mencapai suhu ruang. Gambar di bawah ini adalah salah satu produk yang dihasilkan dari cetakan permanen spesimen uji tarik sebelum di-*finishing*.



Gambar 3.7 Produk Coran dari Cetakan Permanen Spesimen Uji Tarik

7. Dilakukan penimbangan massa produk dan terak pada tiap-tiap tingkatan *recycling*.
8. Untuk *ingot* aluminium struktur dilakukan pengecoran ulang dan kembali ke poin 2 sampai 6 sebanyak 4 kali.
9. Sedangkan untuk spesimen uji tarik, dilakukan *finishing* sesuai dimensi yang telah ditentukan pada ASTM E-8 seperti gambar berikut :



Gambar 3.8 Dimensi Spesimen Uji Tarik

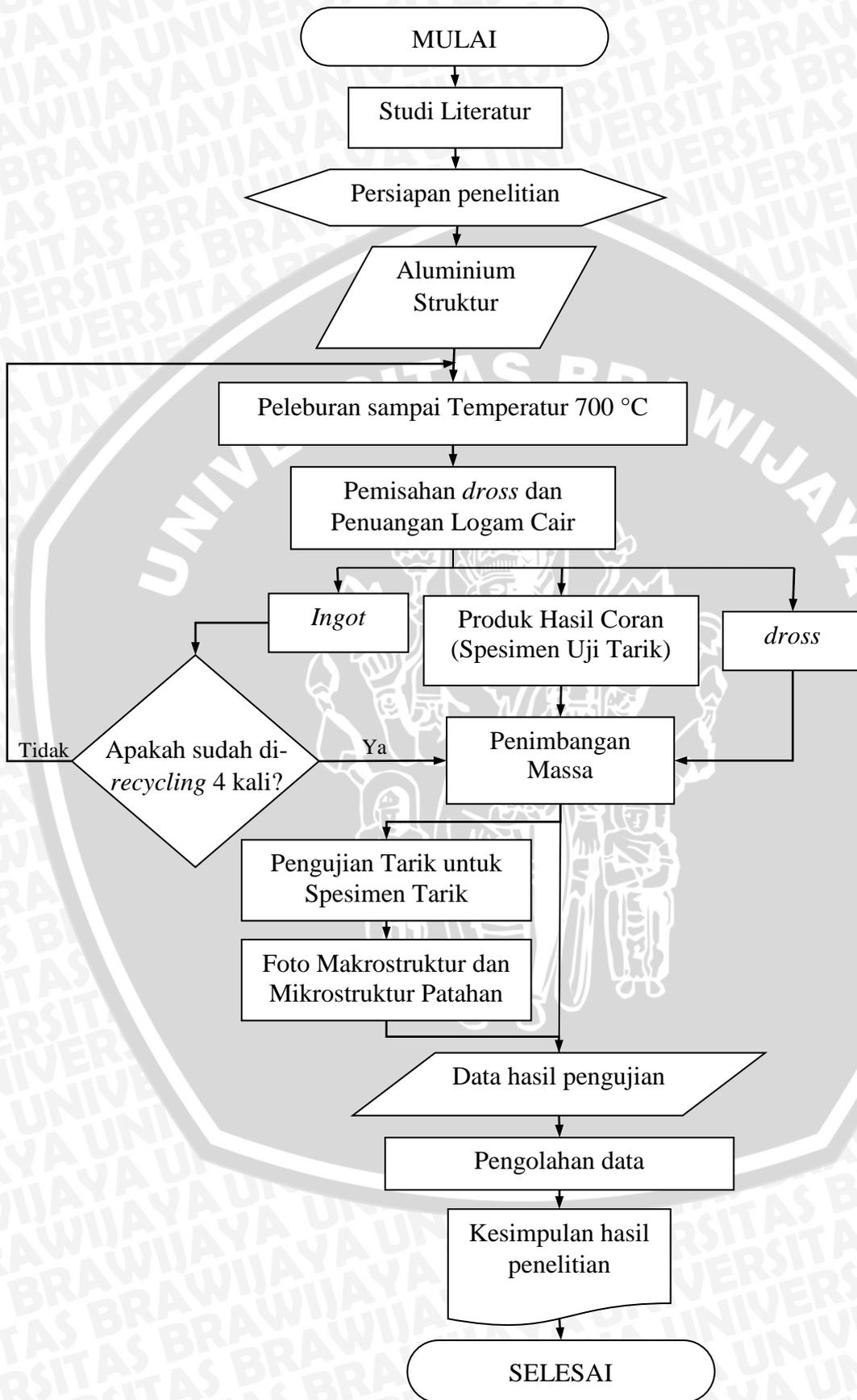
Sebelum dilakukan uji tarik pada *Universal Testing Machine*, dilakukan seleksi 4 benda uji dari 6 benda uji yang mendekati keadaan baik tanpa cacat porositas maupun cacat-cacat yang lain.

10. Berikutnya dilakukan pengujian kekuatan tarik pada tiap spesimen dari tingkat *recycling* I-IV dengan *Universal Testing Machine*

11. Pengambilan foto makrostruktur dari morfologi patahan dengan perbesaran 4 kali
12. Melakukan preparasi metalografi untuk foto mikrostruktur untuk mengetahui ukuran butiran dengan perbesaran sampai 400 kali



## 3.7 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.9 Diagram Alir Penelitian

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

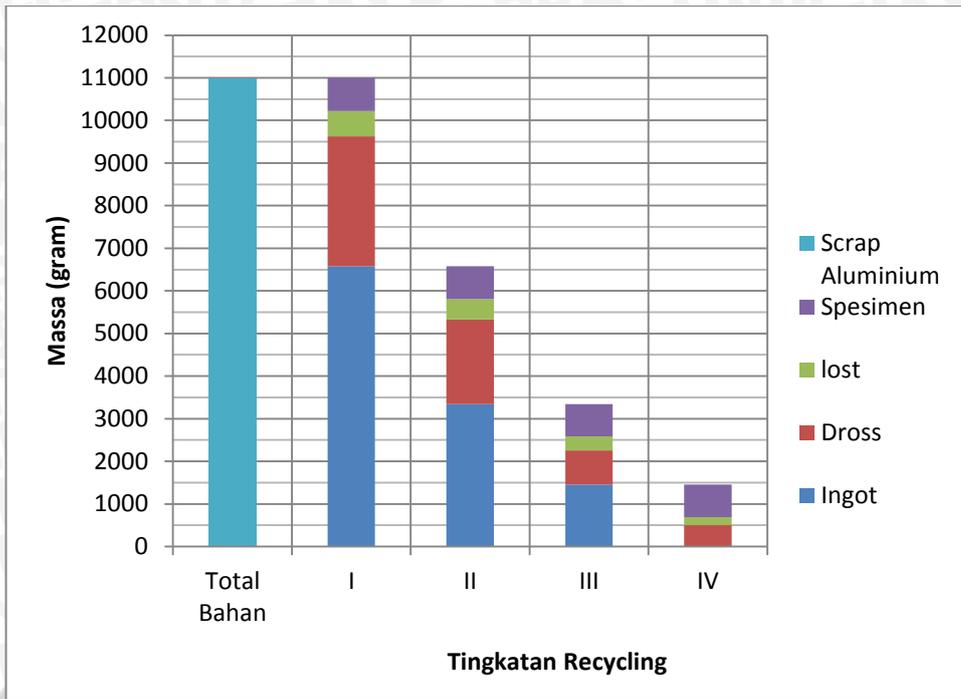
### 4.1 Data Hasil Pengujian dan Perhitungan

#### 4.1.1 Perhitungan *Yield Casting*

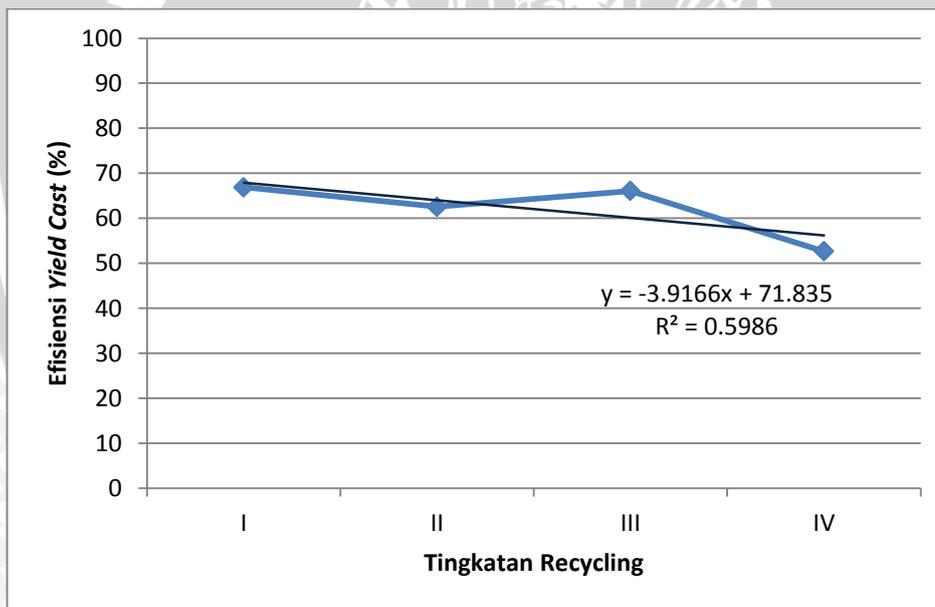
Dalam perhitungan *yield casting* ini dilakukan dengan menimbang seluruh massa input (massa bahan total) dikurangi *dross* dan massa yang hilang pada tiap tingkatan *recycling*, yang dimana massa yang hilang dicari dari massa awal total sebelum tingkatan *recycling* sebelumnya dikurangi massa produk dan massa *dross* atau terak. Tabel dan grafik di bawah ini menjelaskan jumlah massa seluruhnya yang dapat dihitung tiap tingkatan *recycling* dengan perbandingan massa total bahan awal.

Tabel 4.1 Keseimbangan Massa tiap Tingkatan *Recycling*

		Massa (gr)
Total bahan		11000
<i>ingot</i>		6581
I	<i>spesimen</i>	776
	<i>dross</i>	3048
	<i>lost</i>	595
	<i>ingot</i>	3343
II	<i>spesimen</i>	774
	<i>dross</i>	1983
	<i>lost</i>	481
	<i>ingot</i>	1451
III	<i>spesimen</i>	758
	<i>dross</i>	807
	<i>lost</i>	327
	<i>ingot</i>	0
IV	<i>spesimen</i>	764
	<i>dross</i>	501
	<i>lost</i>	186



Gambar 4.1 Grafik Kestimbangan Massa tiap Tingkatan *Recycling*



Gambar 4.2 Efisiensi *yield casting* tiap Tingkatan *Recycling*

Kemudian di bawah ini merupakan grafik efisiensi *yield casting* dari Aluminium struktur tiap tingkatan *recycling* untuk memahami seberapa efisien perbandingan antara massa produk coran dengan massa yang tidak digunakan. Nilai efisiensi *yield casting* masing-masing tiap tingkatan *recycling* adalah 66,88%, 62,56%, 66,08%, dan 52,65%.

#### 4.1.2 Pengujian Karakteristik Kekuatan Tarik

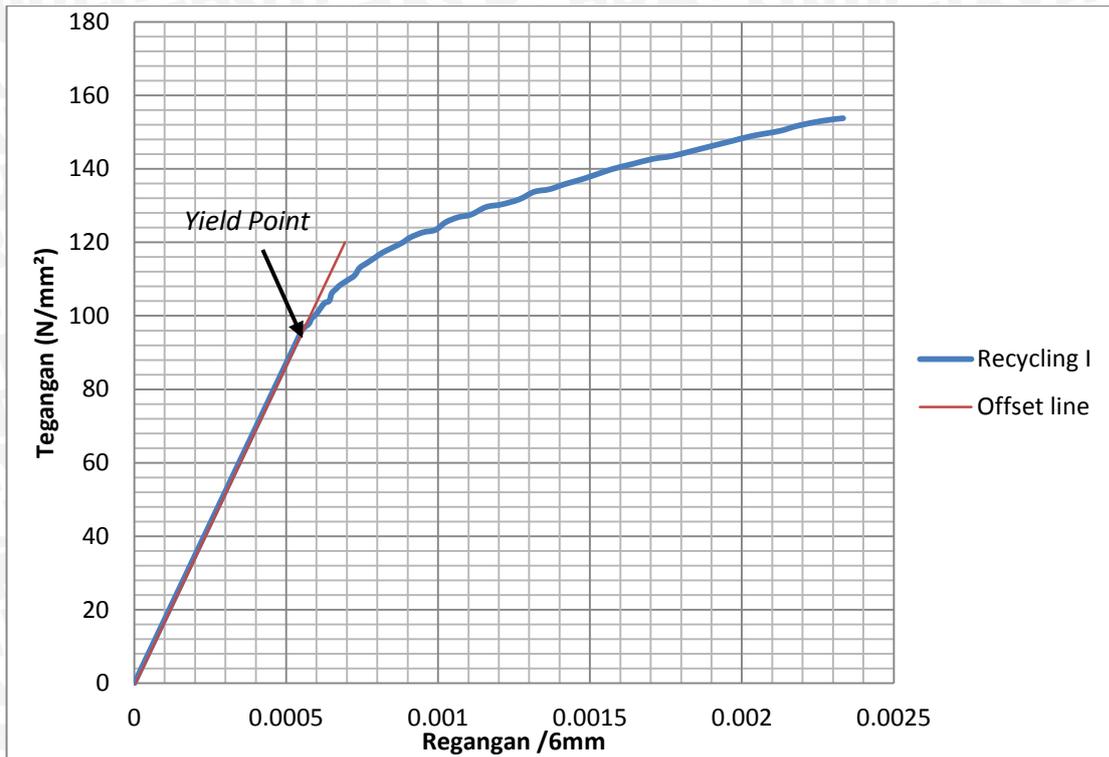
Sebelum dilakukan uji tarik pada *Universal Testing Machine*, dilakukan seleksi 4 benda uji dari 6 benda uji yang mendekati keadaan baik tanpa cacat porositas maupun cacat-cacat yang lain. Setelah itu dilakukan pengujian tarik yang data hasil uji dapat kita lihat pada tabel dan grafik berikut ini.

Tabel 4.2 Data Hasil Karakteristik Tarik Aluminium Struktur

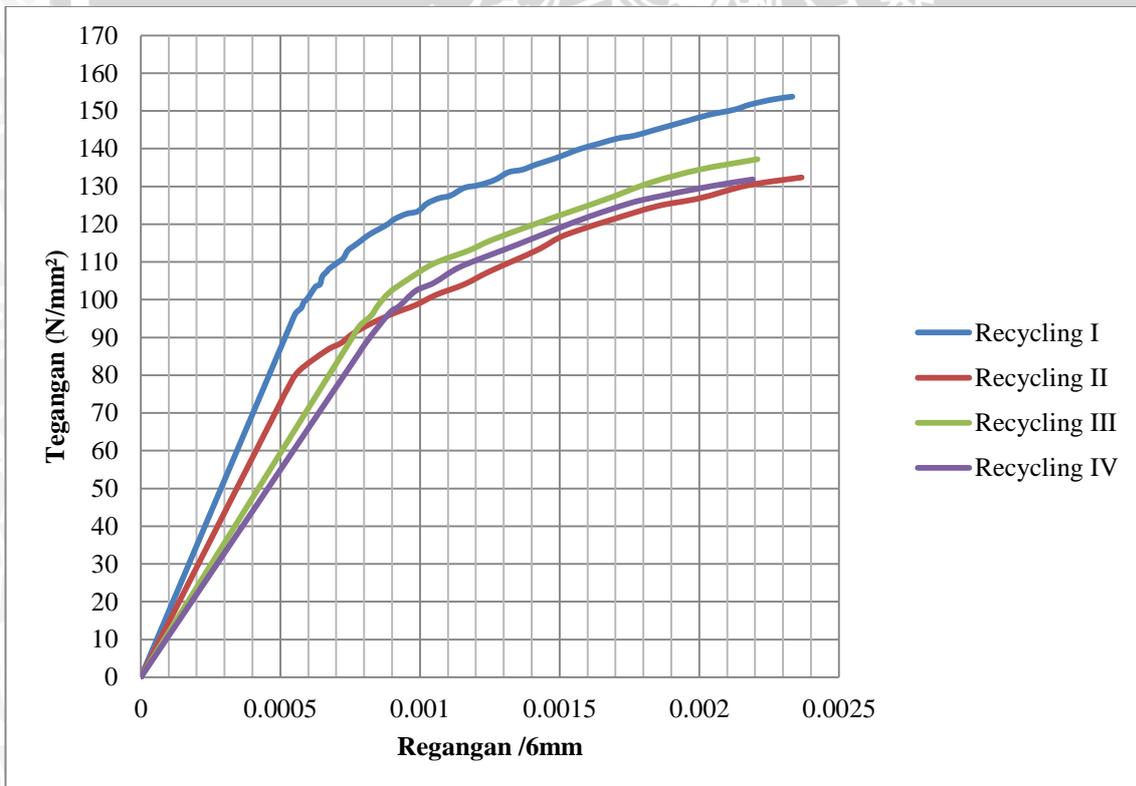
Tingkat Recycling	Kode spesimen	Tegangan Yield (N/mm <sup>2</sup> )	Tegangan Tarik Ultimate (N/mm <sup>2</sup> )	Regangan Maksimal	Tegangan Yield Rata-Rata (N/mm <sup>2</sup> )	Tegangan Ultimate Rata-Rata (N/mm <sup>2</sup> )*	Regangan Maksimal Rata-Rata
I	1A	97,294	153,784	0,00259	97,294	153,784	0,00233
	1B	99,484	157,245	0,00255			
	1C	95,989	151,722	0,00191			
	1D	95,112	150,335	0,00182			
II	2A	78,756	132,389	0,00310	78,756	132,389	0,00237
	2B	74,645	125,478	0,00157			
	2C	92,718	155,858	0,00340			
	2D	59,858	100,622	0,00131			
III	3A	75,506	110,282	0,00240	93,944	137,213	0,00221
	3B	93,944	137,213	0,00221			
	3C	101,987	148,960	0,00230			
	3D	90,886	132,746	0,00195			
IV	4A	116,201	170,367	0,00438	89,933	131,855	0,00219
	4B	88,882	130,315	0,00114			
	4C	89,933	131,855	0,00283			
	4D	105,836	155,171	0,00280			

\*Catatan: Tegangan tarik *ultimate* sama dengan Tegangan *Fracture* karena spesimen patah saat tegangan tarik *ultimate* terjadi.

Untuk mencari titik *yield* pada kurva tegangan-regangan, digunakan metode offset dengan memberi garis sejajar dengan garis linier pada daerah elastis dengan jarak 0,2% dari regangan maksimalnya. Perpotongan dari garis offset dengan kurva tegangan-regangannya adalah titik *yield*-nya, seperti pada gambar berikut :

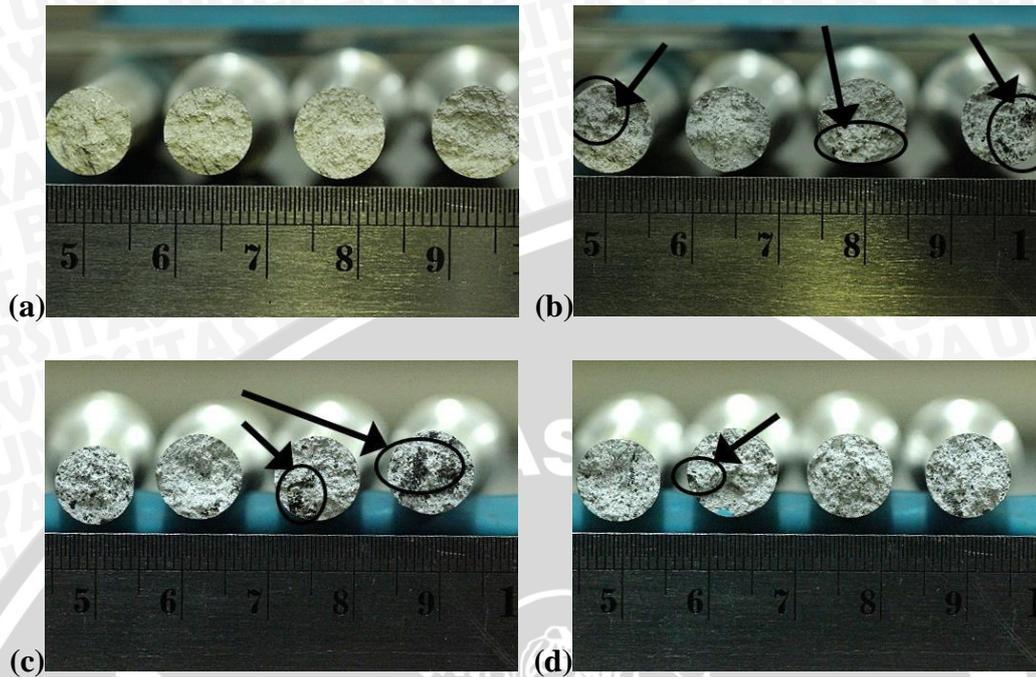


Gambar 4.3 Contoh pembuatan metode offset



Gambar 4.4 Grafik Tegangan – Regangan Aluminium Struktur tiap Tingkatan *Recycling*

#### 4.1.3 Hasil Foto Makrostruktur pada Patahan Hasil Uji Tarik

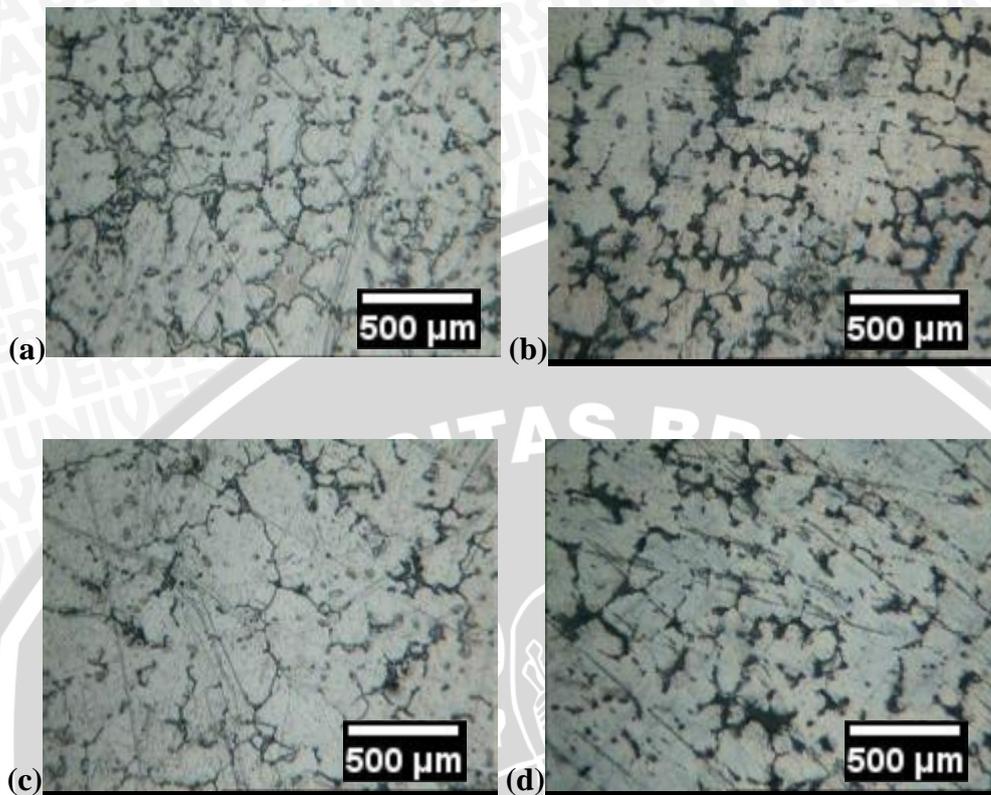


Gambar 4.5 Foto Makrostruktur dengan Perbesaran 4 kali Patahan Hasil Uji Tarik tiap tingkatan *Recycling*: a) I, b) II, c) III, dan d) IV

Pada foto makrostruktur patahan 4 spesimen tingkatan *recycling* I, tidak terlihat adanya inklusi. Tetapi pada tingkatan *recycling* II, III, dan IV dapat terlihat adanya inklusi (berwarna hitam) dengan tingkatan *recycling* II 3 dari 4 spesimen, tingkatan *recycling* III 2 dari 4 spesimen, dan tingkatan *recycling* IV 1 dari 4 spesimen. Hal ini dapat disimpulkan bahwa inklusi terbanyak terjadi pada spesimen benda uji pada tingkat *recycling* ke-2, dan terdapat sedikit inklusi pada spesimen benda uji pada tingkat *recycling* ke-3 dan ke-4.

Dengan adanya inklusi tingkatan *recycling* II dimana terdapat inklusi terbanyak (3 dari 4 spesimen), hal ini berlaku bahwa penyimpangan yang terjadi pada spesimen tingkatan *recycling* II dikarenakan adanya inklusi tersebut.

#### 4.1.4 Hasil Foto Mikrostruktur pada Patahan Hasil Uji Tarik



Gambar 4.6 Foto Mikrostruktur dengan Perbesaran 400x pada Patahan Hasil Uji Tarik tiap tingkatan *Recycling*: a) I, b) II, c) III, dan d) IV

Pada hasil foto mikrostruktur dengan pembesaran 400x pada mikroskop didapatkan hasil seperti gambar diatas. Kelima gambar diatas urut sesuai tingkatan *Recycling* dari I sampai IV. Untuk menghitung diameter butiran, digunakan metode planimetri. Pada metode planimetri dibuat lingkaran dengan luasan  $5000 \text{ mm}^2$ . Kemudian dihitung jumlah butir utuh yang ada dalam lingkaran termasuk butir yang bersinggungan dengan lingkaran. Secara matematis adalah seperti dibawah ini :

$$N_A = f \left( N_{\text{inside}} + \frac{1}{2} N_{\text{intercepted}} \right) \quad (4.1)$$

dengan:

$N_A$  : jumlah butir dalam area ( $\text{butir}/\text{mm}^2$ )

$N_{\text{inside}}$  : jumlah butir bagian dalam lingkaran

$N_{\text{intercept}}$  : jumlah butir yang bersinggungan dengan lingkaran

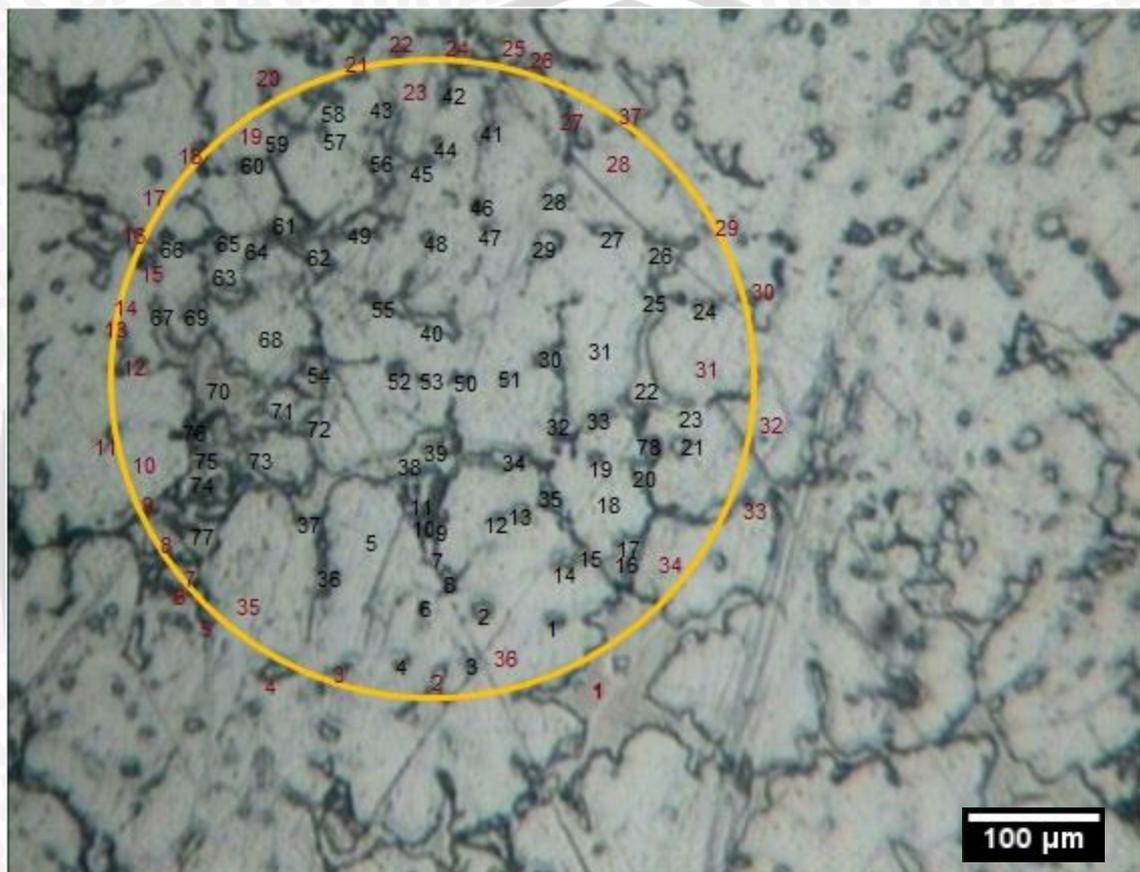
$f$  : faktor pengali Jeffries (Tabel 5 Pengali Jeffries ASTM E 112-96)

Selanjutnya untuk menentukan ukuran diameter butir digunakan persamaan dari ASTM E-112 :

$$G = \{3.322 (\log NA) - 2.954\}$$

dimana :

$G$  = ASTM grain size number



Gambar 4.7 Contoh Pemberian lingkaran pada metode planimetri

$$N_{intercepted} = 37$$

$$N_{inside} = 78$$

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

$$N_A = 34 (78 + 18.5)$$

$$N_A = 3281$$

$$G = 3.322 \log N_A - 2.954$$

$$G = 3.322 \log (3281) - 2.954$$

$$G = 8.726173$$

Untuk diameter butir dapat dilihat pada tabel ASTM E112-96 (terlampir), untuk nilai  $G = 8.73$  diameter rata-rata butiran adalah  $0.01752 \text{ mm} = 17.52 \text{ }\mu\text{m}$ .

Tabel 4.3 Diameter Rata-Rata Butir tiap Spesimen

Tingkat <i>Recycling</i>	G	Diameter rata-rata ( $\mu\text{m}$ )
I	8,73	17,52
II	8,37	19,53
III	8,31	20,27
IV	8,29	20,41

## 4.2 Pembahasan

### 4.2.1 Pembahasan Kesetimbangan Massa

Data dari gambar 4.2 grafik hasil perhitungan Nilai efisiensi *yield casting* dengan nilai masing-masing tiap tingkatan *recycling* 66,88%, 62,56%, 66,08%, dan 52,65% dapat disimpulkan bahwa kecenderungan efisiensinya menurun karena semakin banyak pengulangan *recycling*, semakin banyak fase intermetalik yang terbentuk.

### 4.2.2 Pembahasan Karakteristik Kekuatan Tarik

Pada tabel 4.2 dapat kita lihat bahwa karakteristik kekuatan tarik diantaranya regangan, tegangan *yield*, tegangan *ultimate*, dan tegangan *fracture* (dengan catatan tegangan *ultimate* = tegangan *fracture* karena spesimen patah saat tegangan tarik *ultimate* terjadi.). Pada regangan maksimal, dari tingkat *recycling* I sampai IV kecenderungannya menurun. Tetapi terdapat penyimpangan pada tingkat *recycling* II yang lebih tinggi dibanding tingkat *recycling* I, III, dan IV. Sedangkan tegangan tarik *ultimate* dan *yield* kecenderungannya menurun dari tingkat *recycling* I sampai IV. Akan tetapi, terdapat penyimpangan pada tingkat *recycling* II dimana tegangan tariknya lebih rendah dibanding I dan III. Penyimpangan yang terjadi pada tingkat *recycling* II karena banyaknya inklusi yang menyebabkan penurunan pada kekuatannya dan peningkatan pada regangan maksimalnya, karena dengan adanya inklusi, sifat material menjadi lebih elastis dan *ductile*.

Sedangkan ukuran butir rata-rata dari tingkat *recycling* I-IV adalah cenderung meningkat masing-masing adalah  $17,52 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $19,53 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $20,27 \text{ }\mu\text{m}$ , dan  $20,41 \text{ }\mu\text{m}$ . Hal ini mendukung data pada penurunan tegangan tarik dari tingkat *recycling* I-IV dimana semakin besar ukuran butiran, semakin rendah tegangan tariknya.

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

1. Semakin banyak pengulangan *recycling*, semakin rendah efisiensi pengecoran atau *yield casting* karena semakin banyaknya fase intermetalik yang terbentuk akibat tingkatan *recycling* dengan efisiensi tiap *recycling* masing-masing 66,88%, 62,56%, 66,08%, dan 52,65%.
2. Dari hasil penelitian ini didapat nilai tegangan *yield* rata-rata masing-masing dari *recycling* I sampai IV adalah 97,294 N/mm<sup>2</sup>, 78,756 N/mm<sup>2</sup>, 93,944 N/mm<sup>2</sup>, dan 89,933 N/mm<sup>2</sup>. Kemudian nilai Tegangan *Ultimate* rata-rata yang nilainya sama dengan nilai Tegangan *Fracture* rata-rata karena di saat itulah spesimen patah, masing-masing dari *recycling* I sampai IV adalah 153,784 N/mm<sup>2</sup>, 132,389 N/mm<sup>2</sup>, 137,213 N/mm<sup>2</sup>, dan 131,855 N/mm<sup>2</sup>. Sedangkan regangan rata-ratanya masing-masing dari *recycling* I sampai IV adalah 0,00233, 0,00237, 0,00221, dan 0,00219. Jadi semakin banyak pengulangan *recycling*, semakin rendah tegangan *yield*, tegangan *ultimate*, dan regangan cenderung menurun. Tetapi, pada penelitian kali ini, terdapat penyimpangan pada tingkat *recycling* II dimana terjadinya penurunan yang lebih rendah dari tingkat *recycling* sebelumnya akibat banyaknya inklusi yang bisa dilihat dari penampang patahannya pada foto perbesaran makro. Sedangkan dari hasil foto perbesaran mikro, ukuran butir rata-rata dari tingkat *recycling* I-IV cenderung meningkat masing-masing adalah 17,52  $\mu\text{m}$ , 19,53  $\mu\text{m}$ , 20,27  $\mu\text{m}$ , dan 20,41  $\mu\text{m}$ . Perbedaan ukuran butir yang meningkat itu sesuai dengan teori bahwa semakin besar butiran, semakin rendah kekuatan mekaniknya.

#### 5.2 Saran

1. Pemisahan *dross* sebelum penuangan harus lebih bersih untuk mengurangi adanya inklusi.
2. Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh banyaknya tingkat *recycling* terhadap kekuatan mekanik lainnya selain kekuatan tarik.



## DAFTAR PUSTAKA

- ASM Handbook vol. 2, *In Properties and Selection: Nonferrous alloys and special purpose materials*. ASM International, 2004.
- ASM Handbook vol. 15, *Casting*. ASM International, 2004.
- ASM Handbook vol. 9, *Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004
- ASTM E 112-96. 2004.
- ASTM E 8-00b. ASTM International, 2004.
- Banchhor et al. 2014. Optimization in Green Sand Casting Process for Efficient, Economical and Quality Casting. *International Journal of Advanced Engineering Technology*. 5(1):25-29
- Beeley, P. 1978. *Foundry Technology*. Inggris : University of Leeds.
- Davis, J.R. 2004. *Tensile Testing Second Edition*. Amerika Serikat : ASM International.
- Farner, S. 2000. *Remelting of Aluminium by Continuous Submersion of Rolled Scrap*. Departement of Materials Technology and Electrochemistry Norwegian University of Science and Technology.
- Groover, Mikell P. 2010. *Fundamentals of Modern Manufacturing*. Amerika Serikat : John Wiley & Sons Inc.
- Ismawanto, A., Syarief, A., & Isworo H. 2014. *Simulasi Kekuatan Material pada Carabiner dengan Variasi Geomertri*. Banjarbaru : Universitas Lambung Mangkurat
- Kissel, J.R. & Ferry, R.L. 2002. *Aluminum Structures: A Guide to Their Specifications and Design, 2nd Edition*. Amerika Serikat : John Wiley & Sons Inc.
- Mursalin. 2014. *Keseimbangan Massa*. Jambi: <https://www.academia.edu/8947419/>
- III. KESETIMBANGAN MASSA. (diakses 15 Oktober 2015)
- Puga, H. 2009. Recycling of Aluminium Swarf by Direct Incorporation in Aluminium Melts. *Jurnal of Material Processing*. Pp. 5195-5203.

Purwanto, H & Mulyonorejo. *Pengaruh Pengecoran Ulang Terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan pada Aluminium Cor dengan Cetakan Pasir*. Semarang : Universitas Wahid Hasyim.

Raharjo, S., Abdillah, F.& Wanto, Y. 2011. *Analisa Pengaruh Pengecoran Ulang terhadap Sifat Mekanik Paduan Aluminium ADC 12*. Semarang : Universitas Wahid Hasyim.

Shruthi, Y. C., Ramachandra, C. G., & Veerashekhhar, M. 2014. Productivity Improvement of Castings, Switching to Shell Mould Process from Green Sand Mould Process. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 3(5):594-598

Suprpto, W. 2012. *Porositas Gas pada Material Duralumin dalam Pengecoran Sistem Vakum*. Jakarta : Universitas Indonesia.

Surdia, T. & Chijiwa, K. 2013. *Teknik Pengecoran Logam*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita

Surdia, T. & Saito. 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita

Taylor, S., McClain & Berry. 2000. *Uncertainty Analysis of Metal Casting Porosity Measurement Using Archimedes Principle International Journal of Cast Metal Research vol. 11*. Amerika Serikat : Prentice-Hall International, Inc.

Totten, G, E. 2003. *Handbook of Aluminum*. New York : Marcel Dekker Inc.