

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Mbuya et al. (2010) dalam penelitiannya memaparkan bahwa *recycling* logam paduan dapat digunakan dan menghasikan produk yang sama tanpa adanya penurunan kualitas produk. Sedangkan Samsudi Raharjo, dkk (2011) dalam penelitian yang berjudul “Analisa Pengaruh Pengecoran Ulang Terhadap Sifat Mekanik Paduan Aluminium ADC 12” menyimpulkan bahwa 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°C.

Selain itu, Eder Trejo, dkk (2012) dalam penelitian yang berjudul “*A Novel Estimation Of Electrical And Cooling Losses In Electric Arc Furnaces*” didapatkan hasil bahwa kehilangan energi pada sistem elektrikal dapat mencapai 6% dari total energi input. Dalam perhitungan yang akurat perlu memperkirakan energi yang sungguh-sungguh ditransfer kepada tungku.

2.2 Aluminium

Aluminium merupakan logam non *ferrous* yang banyak terdapat di kerak bumi. Aluminium memiliki densitas 2.7 gram/cm³ yang membuatnya ringan. Bauksit merupakan sumber aluminium. Terdapat beberapa cara pengolahan bauksit untuk mendapatkan aluminium, antara lain proses bayer yang menghasilkan alumina terlebih dahulu, kemudian diolah lagi untuk menghasilkan aluminium, serta cara kedua dengan metode elektrolisa. Aluminium memiliki daya hantar listrik yang baik (60% lebih baik daripada tembaga). Kemudahan dalam mengelola aluminium juga merupakan salah satu pertimbangan, seperti titik lebur 660°C sehingga biaya produksi yang dikeluarkan lebih sedikit.

Aluminium murni yang tersebar dipasaran tidak mengandung 100% aluminium. Hal ini disebabkan karena adanya pengotor pada aluminium. Pengotor tersebut ada dalam aluminium karena masuknya gelembung gas pada proses peleburan dan pendinginan yang tidak sempurna, bahan baku dengan kualitas rendah, atau juga karena cetakan yang kurang baik.

2.2.1 Sifat Aluminium

Sifat umum aluminium antar lain:

- Aluminium merupakan konduktor panas dan elektrik yang baik.

- Sifat ketahanan terhadap korosi baik karena terdapat lapisan Al_2O_3 yang membuat aluminium terlindung dari *corrosive agent*.
- Aluminium merupakan salah satu material yang dapat didaur-ulang. Proses daur ulang ini dapat menurunkan biaya produksi karena energy peleburan aluminium daur ulang tidak terlalu tinggi.
- Aluminium sangat mudah dibentuk dan memiliki sifat mampu mesin yang baik sehingga sangat mudah dalam pembuatan komponen-komponen.

Tabel 2.1. Sifat fisik Aluminium Murni.

Sifat – Sifat	Kemurnian Al (%)	
	99.996	>99.0
Massa Jenis (20 °C)	2.6989	2.71
Titik Cair	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 Pemuai (20–100 °C)	23.86×10^{-6}	23.5×10^{-6}
Jenis Kristal, konstanta kisi	FCC, $a = 4.013 \text{ Kx}$	FCC, $a = 4.04 \text{ kX}$

Sumber : Surdia dan Chijiwa, 1975

Tabel 2.1 menunjukkan sifat fisik aluminium yaitu rapat massa relatif 2.7 g/cm^3 dan titik lebur 660°C . Aluminium memiliki sifat ulet sehingga mudah dimesin dan dibentuk dengan kekuatan tarik sekitar $4\text{-}5 \text{ kg/mm}^2$. Jika dilakukan proses penguatan tegangan seperti dilakukan pengerolan dingin, kekuatannya bisa mencapai sekitar 15 kg/mm^2 . Untuk memperbaiki sifat mekanis dan kekuatan yang rendah harus dipadu dengan unsur lainnya.

Tabel 2.2 Sifat Mekanik Aluminium
Kemurnian Al (%)

Sifat - Sifat	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 Chijiwa, 1975

Aluminium murni memiliki kekuatan tarik 90MPa dan aluminium paduan memiliki kekuatan tarik hingga 600 MPa. Aluminium merupakan logam yang tahan lama, dapat ditempa dengan penampilan luar yang bervariasi mulai dari keperakan hingga keabu-abuan tergantung dari kekasaran permukaannya, memiliki berat sekitar sepertiga berat baja, dapat dicor, ditarik, dan dapat diperlakukan dengan mesin.

2.2.2 Aluminium dan Paduannya

Sifat-sifat pada aluminium merupakan pengaruh dari terdapatnya paduan. Unsur-unsur paduan utama untuk pengecoran aluminium paduan dasar adalah silikon, magnesium, tembaga, seng, kromium, titanium, timah, dan mangan yang dapat merubah

sifat paduan aluminium. Aluminium dasar paduan secara umum ditandai sebagai sistem eutektik yang mengandung bahan intermetalik atau unsur-unsur fase berlebih.

Berdasarkan *American Standard Testing Materials* (ASTM), aluminium tuang dan paduannya dirancang dalam 9 seri penomoran, seperti terlihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Seri Penomoran Aluminium dan Paduannya

Nomor Seri	Paduan	Sifat
2xx.x	aluminium-tembaga	<ul style="list-style-type: none"> • Konduktivitas listrik yang baik • Ketangguhan tinggi • Ketahanan <i>fatigue</i> tinggi • Tahan korosi • Kekerasan dan kekuatan meningkat • Memiliki keuletan yang baik
3xx.x	aluminium-silikon-magnesium	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat menurunkan konduktivitas termal • Memiliki sifat mampu cor yang baik • Tahan korosi • Keuletan meningkat
4xx.x	aluminium-silikon	<ul style="list-style-type: none"> • Sifat mampu mesin menurun • Memiliki sifat mampu cor yang baik • Tahan korosi • Memiliki fluiditas yang baik • Sifat mampu mesin menurun
5xx.x	aluminium-magnesium	<ul style="list-style-type: none"> • Sifat mampu alir yang baik • Ketangguhan dan kekuatan yang baik • Tahan korosi • Sifat mampu las dan mampu mesin yang baik
7xx.x	aluminium-zinc	<ul style="list-style-type: none"> • Kemungkinan terjadi penyusutan menurun • Memiliki sifat mampu mesin baik • Tahan korosi yang baik • Sifat mampu cor buruk

Tidak terdapat sistem penamaan paduan aluminium pada seri 6xx.x dan 9xx.x. cara pembacaannya adalah sebagai berikut:

1. Angka pertama menunjukkan kelompok paduan
2. Angka kedua dan ketiga menunjukkan jenis spesifikasi komposisi aluminium paduan.
3. Angka keempat menunjukkan bentuk produk, 0 untuk spesifikasi coran, 1 untuk spesifikasi batangan, dan 2 untuk spesifikasi batangan yang lebih sempit.
4. Pada seri 1xx.x, dua angka terakhir menunjukkan jumlah kadar minimum aluminium pada paduan dalam 99.00%.
5. Pada seri 2xx.x hingga 8xx.x, dua angka terakhir menunjukkan kandungan unsur paduan utama.

2.2.3 Aplikasi Paduan Aluminium

Aluminium untuk *packaging* dibuat dalam bentuk lembaran tipis (*foil*). Biasanya digunakan sebagai kaleng minuman dan pembungkus makanan lainnya. Aluminium yang digunakan untuk tujuan ini biasanya dibuat dari seri 5xx.x yang relatif ulet namun memiliki kemampuan pengerasan regang yang tinggi.

Sebagian besar aluminium konstruksi terbuat dari seri 3xx.x. paduan aluminium yang tidak korosif membuat pemakaiannya tidak memerlukan biaya perawatan yang tinggi. Aplikasi aluminium ini bervariasi seperti rangka jendela, rangka pintu, rangka atap tirai, dan atap.

Paduan aluminium untuk mesin sebagian besar adalah 3xx.x yang memiliki kemampuan cor yang baik, kekerasan yang tinggi, dan dapat diberi perlakuan panas. Untuk aplikasi pesawat terbang, paduan aluminium yang populer digunakan adalah durallumin (Al - 4% Cu - 0.5% Mg - 0.5% Mn). Paduan ini memiliki kekerasan tinggi namun memiliki ketahanan korosi yang rendah sehingga perlu dilapisi dengan lembaran aluminium murni yang dikenal sebagai aluminium *cladding* (Sofyan, 2010).

2.2.4 Aluminium Struktur

Dalam bidang konstruksi bangunan dewasa ini aluminium telah banyak digunakan sebagai bahan konstruksi khususnya untuk bangunan gedung. Bahan konstruksi bangunan gedung dari aluminium tersebut antara lain :

1. berbentuk batangan dengan berbagai macam profil penampang. Setiap batangnya tersedia dengan panjang 6 meter, bentuk dan ukuran profil sangat bervariasi sesuai

dengan kegunaannya dalam konstruksi antara lain profil-profil batang untuk kusen, profil-profil batang untuk rangka daun pintu, untuk konstruksi kusen dan daun jendela, untuk tiang / rangka dinding partisi (penyekat ruang), untuk *rolling door*, untuk *folding gate*, dan sebagainya.

2. berbentuk pita / pelat tipis dengan lebar tertentu (misal ± 30 mm) tersedia dalam bentuk gulungan (rol), biasanya untuk bahan awning dan krei.
3. bentuk-bentuk profil khusus seperti *handle* daun pintu dan profil profil khusus lainnya.

Spesifikasi aluminium struktur terdapat aturan untuk menentukan kekuatan aluminium struktur komponen, koneksi dan struktur baik menggunakan kekuatan yang diijinkan atau beban dan metode desain faktor hambatan (Brock, 2015). Faktor keamanan untuk bangunan dan jembatan dan faktor resistensi untuk bangunan mengenai:

1. spesifikasi bahan.
2. modulus elastisitas, kelelahan, kekuatan luluh tekan, dan kekuatan ultimat geser.
3. kekuatan paduan cor.
4. kompresi aksial kekuatan tekuk .
5. metode alternatif untuk menentukan kekuatan kolom dan balok .
6. kekuatan lentur untuk tekuk lokal dan lateral-torsional *buckling*.
7. kekuatan geser dan torsi batang dan di jaring didukung pada satu ujung.
8. koneksi las, termasuk parsial penetrasi bersama las *groove*.
9. pengujian, kontrol kualitas dan jaminan kualitas.

2.3 Pengecoran Logam

Pengecoran logam adalah proses pembuatan benda kerja yang berbahan logam dengan cara meleburkan logam, menuangkan logam cair pada cetakan, dan solidifikasi. Pada pengecoran logam sangat diperhatikan mulai dari proses peleburan. Penuangan logam, hingga pengecekan hasil, ada faktor tertentu yang mempengaruhi hasil pengecoran tersebut.

2.4 Macam-macam Tungku

2.4.1 *Automatic Pouring System (APS)*

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 (Rasyid, 2015).

Lingkungan kerja dalam penuangan bersifat buruk yang disebabkan oleh panas, debu dan asap. Pembuatan cetakan yang makin cepat pada akhir-akhir ini menyebabkan menjadi sukarnya penuangan dengan mempergunakan orang. Namun, untuk besi cor dan logam lainnya biasanya dipergunakan empat cara dalam penuangan otomatis yaitu:

1. Jenis sumbat

Pada jenis ini tanur induksi frekuensi rendah dipergunakan sebagai ladell penuang. Pada dasar ladell terdapat sumbat yang dapat diajalankan secara hidrolis. Seluruh tanur bergerak seremoak bersama dengan gerak aliran cetakan diatas yang sejajar dengan rel pembuat cetaan. Pada akhir penuangan sianr infra merah dari cairan logam yang meluap ditangkap oleh lubang fotosel dan signalnya diamplifikasikan untuk menutup sumbat.

2. Jenis ladell yang dapat miring

Ladell yang biasanya dijalankan dengan tangan, pada jenis ini dirubah menjadi mesin penuang otomatis. Dalam hal ini termasuk ladell jenis tunggal dan jenis gabungan yang menggabungkan satu tanur penyimpan dengan beberapa ladell. Penuangan dilakukan secara otomatis dengan memiringkan ladell, mengikuti gerak dari cetakan. Untuk mengisi ladell, ladell bergerak mendekati tanur penyimpan yang mempunyai penyumbat. Cairan logam dikeluarkan secara otomatis dan terputus-putus dengan membuka dan menutup sumbat. Jumlah caian logam yang diberikan diatur secara otomatis dengan mesin penimbang yang dipasang pada ladell. Tanur penyimpan berkapasitas dua atau tiga ton dan didampingi oleh dua atau tiga ladell. Mesin penuang otomatis ini dapat dipakai bersama mesin pembuat cetakan yang berkecepatan tinggi.

3. Jenis tekanan

Pada jenis peralatan ini, logam cair dalam tanur penyimpanan dituangkan melalui lubang penuang dengan perantaran tekanan udara.

4. Jenis pompa elektromagnet

Pompa elektromagnet adalah pompa yang memberikan gaya orong pada cairan logam yang timbul dari aksi electromagnet antara lapangan magnet yang bergerak dan arus induksi pada cairan. Cairan diangkat melalui saluran gradient angka dan dituangkan melalui lubang penuangan. Mesin penuang terdiri dari cawan tuang, sebuah pompa elektromagnetis dan saluran pengeluaran. Mesin ini dapat

memberikan respon cepat pada signal pengatur, dapat diatur dari jauh dan baik untuk pembawa secara otomatis, karena pengaturan penuangan yaitu membawa cairan dan menghentikan penuangan, dijalankan secara listrik.

2.4.2 Tungku Reverberatory

Tungku *reverberatory* secara luas digunakan untuk meleburkan logam nonferrous dan besi. *Reverberatory* merupakan jenis tungku dimana logam dilebur oleh panas dari pembakaran bahan bakar di salah satu ujung perapian, melewati bak yang isinya logam yang dicairkan menuju tumpukan di ujung lain. Di dalam tungku *reverberatory* akan mengalami proses konveksi dan radiasi (panas dipantulkan) dari atap dan dinding-dinding samping. Kemudian gas buang (limbah panas) akan dikeluarkan melalui cerobong (*stack*). 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. Tungku ini diproduksi dalam berbagai konfigurasi konstruksi yang tetap atau miring, persegi panjang atau silinder dengan kapasitas leleh 200-1300 kg/jam (Agus, 2015).

2.4.3 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*.

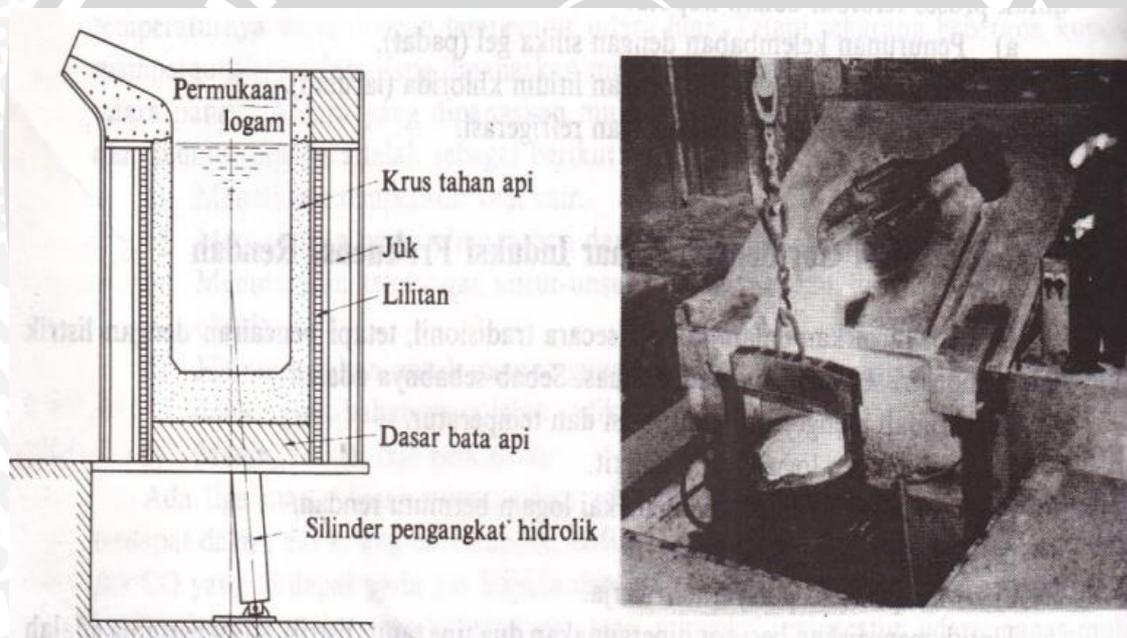
Salah satu kelebihan *electrical furnace* dari *basic oxygen furnace* adalah kemampuan untuk mengolah scrap menjadi 100% material cair. Kapasitas produksinya dapat mencapai 400 ton. *Electrical furnace* memiliki bentuk fisik yang cukup rendah sehingga dalam hal pengisian bahan baku sangat mudah. Dalam hal pengoperasiannya juga tidak terlalu sulit karena hanya memerlukan beberapa orang operator yang memantau proses peleburan dan penggunaan listrik pada dapur tersebut (Taylor, 1985).

2.5 Proses Peleburan Logam

Peleburan atau pencairan adalah proses yang menghasilkan perubahan fase zat dari padat ke cair. Energi internal zat padat meningkat (biasanya karena panas) mencapai *temperature* tertentu (disebut titik leleh) saat zat ini berubah cair. Tungku tungku peleburan yang biasanya digunakan dalam industri pengecoran logam antara lain, dapur induksi, dapur listrik, dapur kruz. Karakteristik masing masing tungku peleburan adalah:

1. Dapur Induksi Jenis Frekuensi Rendah (Jenis Krus)

Dapur induksi frekuensi rendah yang dipakai adalah jenis krus yaitu dapur berinti dimana lilitan kedua yang didinginkan air mengelilingi krus dan di luar lilitan diletakkan juk yang terdiri dari pelat berlapis banyak, berfungsi untuk memusatkan fluks magnet dan menahan lilitan. Gambar dapur induksi jenis frekuensi rendah dapat dilihat pada Gambar 2.1.

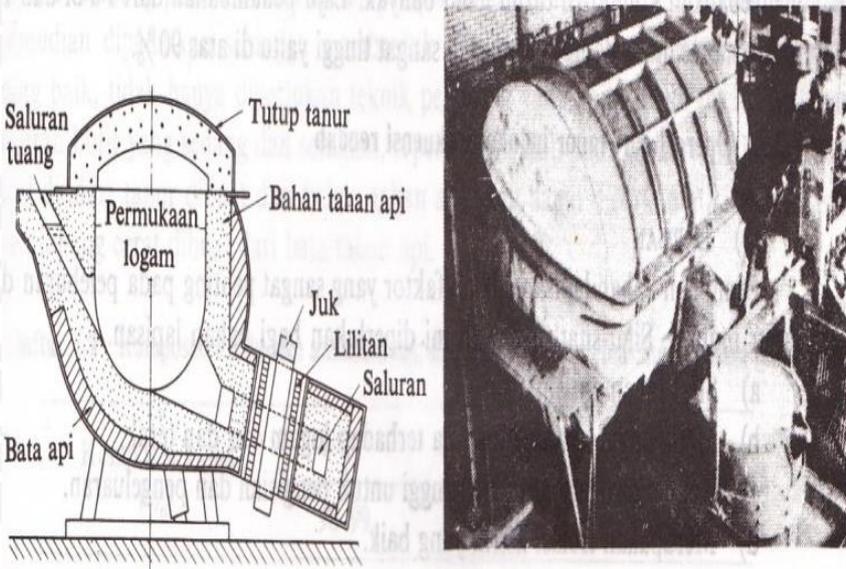


Gambar 2.1 Dapur Induksi Jenis Frekuensi Rendah

Sumber : Surdia dan Kenji, 2013:146

2. Dapur Induksi Jenis Frekuensi Rendah (Jenis Saluran)

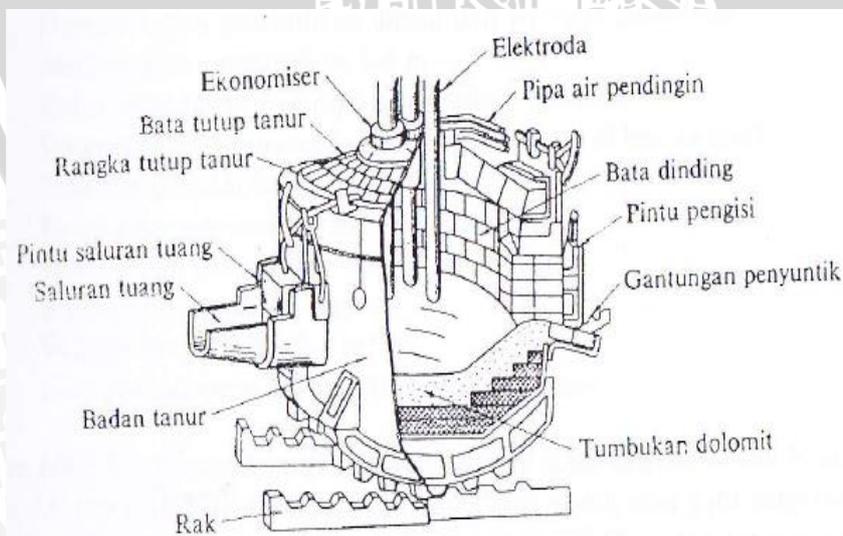
Ruang dapur dibagi menjadi dua daerah, daerah pemanasan dan daerah krus. Dapur jenis ini menggunakan energi listrik yang lebih sedikit tetapi memerlukan bahan tahan api yang netral berkualitas tinggi. Dapur ini digunakan pada peleburan kontinu dimana logam cair dapat dikeluarkan dengan sudut kemiringan kecil. Gambar dapur induksi jenis saluran dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Dapur Induksi Jenis Saluran
Sumber : Surdia dan Kenji, 2013:147.

3. Dapur Listrik

Dapur listrik *heroult* merupakan jenis dapur yang banyak dipakai. Dapur ini menggunakan arus bolak balik tiga fasa. Energi panas diberikan dan loncatan busur listrik antara elektroda karbon dan coran baja. Terak menutupi cairan dan mencegah absorpsi dari udara luar selama permunian. Untuk bagian dari dapur listrik *heroult* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gbr. 8.1 Tanur listrik Heroult.

Gambar 2.3 Dapur Listrik *Heroult*
Sumber : Surdia dan Kenji, 2013:164

Tungku-tungku peleburan yang biasanya digunakan dalam industry pengecoran logam antara lain dapur industri, dapur listrik, dapur kruz. Paduan aluminium dan paduan ringan yang lain dilebur dengan tungku listrik dan tungku krusibel. Tungku krusibel memiliki konstruksi yang sederhana dan serbaguna untuk digunakan pada skala kecil dan sedang. Tungku krusibel menggunakan bahan bakar minyak, gas, dan induksi listrik frekuensi rendah.

Dari jenis dapur yang telah dibahas di atas, berikut ini disimpulkan perbedaan dapur listrik dengan dapur induksi, seperti yang tertera pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Perbedaan Dapur Listrik dengan Dapur Induksi

Dapur Listrik	Dapur Induksi
<ul style="list-style-type: none"> • Material logam dapat mencair karena adanya elektroda yang dihubungkan dengan rangkaian listrik yang akan membentuk busur api yang akan mencairkan logam • Terjadi kontak dengan elemen pemanas • Kapasitas peleburan tinggi (25 – 50 ton/jam) • Karena kapasitas peleburan yang tinggi maka konsumsi daya listrik tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> • Menggunakan arus bolak balik yang dialirkan ke suatu komponen untuk menghasilkan medan magnet dalam dan dihasilkan arus induksi sehingga terjadi pemanasan dan peleburan logam • Tidak terjadi kontak dengan elemen pemanas • Kapasitas peleburan lebih rendah dari dapur listrik (beberapa kg – 3.6 ton) • Konsumsi daya listrik lebih rendah di dapur listrik

Pada proses peleburan sering diperlukan penambahan fluks. Fluks adalah bahan yang digunakan untuk membersihkan atau mengikat kotoran yang terjadi pada saat proses peleburan. Penambahan fluks sendiri dinamakan *fluxing*, pemberian fluks 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”.

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 2.5 berikut ini:

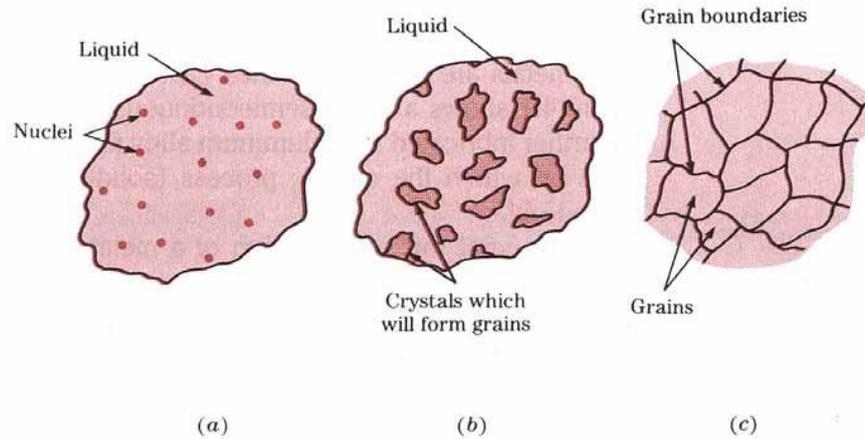
Tabel 2.5 Titik Cair dan Temperatur dari Paduan Aluminium

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 : 237

2.6 Solidifikasi

Solidifikasi (pembekuan) adalah transformasi logam cair kembali ke bentuk padatnya, yang mana logam dicairkan dan dimasukkan ke cetakan dan dibiarkan membeku menjadi produk akhir. Proses solidifikasi dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Proses Pembekuan Logam Dari Cair Hingga Beku
Sumber: Beeley (2001 : 62)

Tahapan dalam pembekuan logam (solidifikasi) ada 2, yaitu :

1. Pembekuan inti stabil

a. Pengintian homogen

Pengintian dalam suatu logam cair terjadi saat logam menyediakan atom-atom untuk membentuk inti.

b. Pengintian heterogen

Proses pengintian yang sama dengan proses pengintian homogen hanya saja pengintian terjadi dalam logam cair yang berada pada permukaan cetakan atau logam cair yang tidak murni seperti logam paduan

2. Pertumbuhan Kristal dalam logam cair dan pembentukan struktur butir

Setelah inti yang stabil terbentuk pada logam memadat, kemudian inti tumbuh menjadi Kristal . Saat pembekuan total terjadi, antara Kristal saling bertemu membentuk batas butir (grain boundaries) dan butiran (*grains*). Menurut hukum Chvorinov, *riser* harus diletakkan pada bagian/daerah yang memiliki rasio volume terhadap luas rendah, karena pada daerah tersebut akan mengalami solidifikasi paling cepat. Dengan menambahkan *riser* pada daerah tersebut, maka solidifikasi dapat diperlambat sehingga cacat coran akibat terjadinya *shrinkage* pada benda cor dapat dihindarkan.

Daerah pembekuan logam

1. *Chill zone*

Selama proses penuangan logam cair ke dalam cetakan, logam cair yang berkontak langsung dengan dinding cetakan akan mengalami pendinginan yang cepat

di bawah temperatur liquidusnya. Akibatnya pada dinding cetakan tersebut timbul banyak inti padat dan selanjutnya tumbuh ke arah cairan logam.

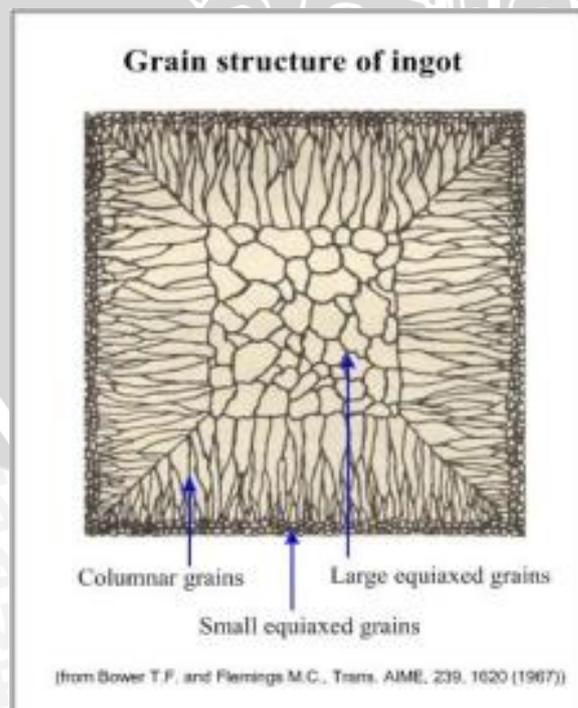
2. *Columnar zone*

Sesaat setelah penuangan, gradien temperature pada dinding cetakan menurun dan Kristal pada daerah *chill* tumbuh memanjang dalam arah perpindahan panas. Kristal-kristal tersebut tumbuh memanjang berlawanan dengan arah perpindahan panas (panas bergerak dari cairan logam kearah dinding cetakan yang bertemperatur lebih rendah) yang disebut dengan *dendrite*. setiap Kristal *dendrite* mengandung banyak lengan-lengan *dendrite* sekunder dan tersier akan timbul dari lengan *dendrite* primer. Daerah yang terbentuk antara ujung *dendrite* dan titik dimana sisa cairan terakhir akan membeku disebut sebagai *mushy zone* atau *pasty zone*.

3. *Equiaxed zone*

Daerah ini terjadi dari butir-butir equiaxed yang tumbuh secara acak di tengah-tengah *ingot*. Pada daerah ini perbedaan temperature yang ada tidak menyebabkan terjadinya pertumbuhan butir memanjang.

Berikut ini ditunjukkan gambar daerah-daerah pembekuan logam pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 *Chill, columnar dan equiaxed zone*
Sumber : Beeley, (2001 : 63)

2.7 Recycling Aluminium

Daur ulang aluminium memiliki keuntungan dari sisi lingkungan dan biaya produksi. Energi yang dibutuhkan untuk produksi aluminium daur ulang (*secondary production*) adalah 10-20 MJ/Kg. sedangkan untuk produksi aluminium dari bauksit (*primary production*) adalah 186MJ/Kg. Rentang perbedaan kebutuhan energi antara *primary production* dan *secondary production* untuk aluminium merupakan rentang terbesar apabila dibandingkan dengan logam lainnya. Oleh karena itu, melakukan daur ulang aluminium dapat menekan biaya produksi (Gaustad, 2011).

2.8 Kekerasan

Kekerasan material merupakan ketahanan material terhadap indentasi permanen atau deformasi saat kontak dengan indenter yang diberi beban. Berdasarkan bentuk indentornya, pengujian kekerasan dibagi menjadi tiga, yaitu indenter 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 indenter, dengan satuan kilogram per milimeter persegi (Kgf/mm^2). Sedangkan pada pengujian *rockwell*, kedalaman indentasi pada beban tertentu kemudian dikonversi ke nomor kekerasan (tanpa satuan pengukuran), yang mana berbanding terbalik dengan kedalaman.

2.8.1 Uji Kekerasan *Rockwell*

Uji kekerasan *rockwell* ini juga didasarkan kepada penekanan sebuah *indenter* dengan suatu gaya tekan tertentu ke permukaan yang rata dan bersih dari suatu logam yang diuji kekerasannya. Setelah gaya tekan dikembalikan ke gaya *minor* maka yang dijadikan dasar perhitungan nilai kekerasan *rockwell* bukanlah hasil pengukuran diameter ataupun diagonal bekas lekukan tetapi justru “dalamnya bekas lekukan yang terjadi itu”. Inilah kelainan cara *rockwell* dibandingkan dengan cara pengujian kekerasan lainnya.

Pengujian *rockwell* yang umumnya biasa dipakai ada ke jenis yaitu HR_A , HR_B , dan HR_C . HR itu sendiri merupakan suatu singkatan dari kekerasan *rockwell* atau *rockwell hardness number* dan kadang-kadang disingkat dengan huruf R saja.

Pengujian kekerasan dengan metode *rockwell* ini diatur berdasarkan standar DIN 50103. Tingkat skala kekerasan menurut metode *rockwell* adalah berdasarkan pada jenis *indenter* yang digunakan pada masing-masing skala. Dalam metode *rockwell* ini terdapat dua macam *indenter* yang ukurannya bervariasi, kedua jenis *indenter* itu adalah:

- a. Kerucut intan dengan besar sudut 120° , dikenal pula dengan “*Rockwell cone*”.
- b. Bola baja dengan berbagai ukuran, dikenal pula dengan “*Rockwell*”.

Untuk cara pemakaian skala ini, lebih dahulu ditentukan dan dipilih ketentuan angka kekerasan maksimum yang boleh digunakan oleh skala tertentu. Jika pada skala tertentu tidak tercapai angka kekerasan yang akurat, maka kita tentukan skala lain yang dapat menunjukkan angka kekerasan yang jelas. Sebagaimana rumus tertentu, maka skala memiliki standar atau acuan.

Untuk mendapatkan nilai HR_B harus menggunakan sebuah *indenter* berupa bola baja yang disepuh dengan ukuran $\varnothing 1/16''$ dan ini digunakan untuk jenis logam yang tidak mendapatkan perlakuan pengerasan sebelumnya (sepuh) dan untuk semua jenis *non-ferrous* dalam kondisi padat. Sedangkan untuk mendapatkan nilai HR_C digunakan sebuah *indenter* kerucut *diamond* yang memiliki sudut puncak 120° yang ujungnya dibundarkan dengan jari-jari 0.2 mm dan dipakai untuk menentukan kekerasan baja-baja yang telah dikeraskan. Kerucut *diamond* biasa disebut juga “*brale*”.

2.8.2 Uji Brinell

Uji *brinell* dilakukan dengan penekanan sebuah bola baja yang terbuat dari baja *chrom* yang telah dikeraskan dengan diameter tertentu, oleh gaya tekan secara statis kedalam permukaan logam yang diuji harus rata dan bersih. Setelah gaya tekan ditiadakan dan bola baja dikeluarkan dari bekas lekukan, maka diameter paling atas dari lekukan tadi diukur secara teliti untuk kemudian dipakai untuk penentuan kekerasan logam yang diuji dengan menggunakan persamaan 2-1.

$$BHN = \frac{2P}{\pi D [(D - \sqrt{D^2 - d^2})]} \quad (2-1)$$

Dimana :

P = Beban yang diberikan (KP atau Kgf).

D = Diameter indenter yang digunakan.

d = Diameter bekas lekukan.

Kekerasan ini disebut kekerasan *brinell* yang biasa disingkat dengan HB atau BHN (*Brinell Hardness Number*). Bertambah keras logam yang diuji bertambah tinggi nilai HB.

2.8.3 Uji Kekerasan *Vickers*

Uji *vickers* ini didasarkan kepada penekanan oleh suatu gaya tekan tertentu oleh sebuah *indentor* berupa *pyramid diamond* terbalik yang memiliki sudut puncak kepermukaan logam yang diuji kekerasannya, dimana permukaan logam yang diuji ini harus rata dan bersih.

Setelah gaya tekan secara statis ini kemudian ditiadakan dan *pyramid diamond* dikeluarkan dari bekas yang terjadi (permukaan bekas merupakan segi empat karena piramid merupakan piramid sama sisi), maka diagonal segi empat bekas teratas diukur secara teliti untuk kemudian digunakan sebagai kekerasan logam yang diuji. Nilai kekerasan yang diperoleh sedemikian itu disebut kekerasan *vickers* yang biasa disingkat dengan Hv atau HVN (*Vicker Hardness Number*).

2.9 Metalografi

Ilmu logam dibagi menjadi dua bagian, yaitu metalurgi dan metalografi. Metalurgi adalah ilmu yang menguraikan tentang cara pemisahan logam dari ikatan unsur-unsur lain. Atau cara pengolahan logam secara teknis untuk memperoleh jenis logam atau logam paduan yang memenuhi kebutuhan tertentu. Sedangkan metalografi adalah ilmu yang mempelajari tentang cara pemeriksaan logam untuk mengetahui sifat, struktur, temperatur dan persentase campuran logam tersebut. Metalografi merupakan suatu pengetahuan yang khusus mempelajari struktur logam dan mekanisnya. Dalam metalografi dikenal pengujian makro dan pengujian mikro (Norman, 2010).

Pengujian makro ialah proses pengujian bahan yang menggunakan mata terbuka dengan tujuan dapat memeriksa celah dan lubang dalam permukaan bahan. Angka kevalidan pengujian makro berkisar antara 0.5 sampai 50 kali. Pengujian cara demikian biasanya digunakan untuk bahan-bahan yang memiliki struktur kristal yang tergolong besar atau kasar. Misalnya, logam hasil coran (tuangan) dan bahan yang termasuk non-metal (bukan logam).

Pengujian mikro ialah proses pengujian terhadap bahan logam yang bentuk kristal logamnya tergolong sangat halus. Mengingat demikian halusnya, sehingga pengujiannya menggunakan suatu alat yaitu mikroskop optis bahkan mikroskop elektron yang memiliki kualitas pembesaran antara 50 hingga 3000 kali.

2.10 Inklusi

Inklusi merupakan pengotor dalam paduan aluminium tuang yang tidak diinginkan. Pada umumnya, inklusi yang terdapat pada aluminium cair adalah oksida (Al_2O_3 , MgO),

karbida (Al_3C_4 , TiC), hingga fasa intermetalik ($MnAl_3$, $FeAl_3$). Adanya inklusi dapat menyebabkan masalah pada sifat-sifat paduan aluminium tuang. Salah satu masalah yang ditimbulkan adalah proses machining yang sulit karena inklusi terdiri dari partikel keras sehingga lebih keras daripada *tool*, mengurangi kekuatan dan ketahanan terhadap *fatigue* hingga dapat meningkatkan porositas dan korosi (Arifin dkk, 2007).

Fasa intermetalik merupakan salah satu jenis inklusi yang sering ditemukan pada paduan aluminium tuang. Fasa intermetalik merupakan fasa kedua yang mengendap pada struktur mikro paduan aluminium, biasanya antara logam dan logam sebagai hasil kadar berlebih yang melebihi batas kelarutannya (Callister Jr et al, 2002).

2.11 Energi Peleburan

Titik lebur dari sebuah benda padat adalah suhu dimana benda tersebut berubah wujud menjadi benda cair. Energi internal zat padat meningkat mencapai temperatur tertentu saat zat ini berubah menjadi cair. Logam melebur dengan suhu tetap membutuhkan kalor. Energi kalor yang diperlukan tidak digunakan untuk menaikkan suhunya, tetapi untuk mengubah wujud logam dari padat menjadi cair.

Kalor adalah energi yang berpindah dari benda yang bersuhu tinggi menuju benda yang suhunya lebih rendah. Saluran kalor adalah kalori. Kalor adalah jumlah kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu logam cair sebesar 1 derajat celcius.

Energi untuk Peleburan aluminium.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2-2)$$

Keterangan :

Q = kalor yang diterima suatu zat (Joule)

m = massa zat (Kilogram)

c = kalor jenis zat (Joule/kilogram $^{\circ}C$)

ΔT = perubahan suhu ($^{\circ}C$) $\rightarrow (t_2 - t_1)$

Energi panas yang dibutuhkan adalah jumlah 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 :

$$H = \rho V \{C_s (T_m - T_o) + H_f + C_l (T_p - T_m)\} \quad (\text{Surdia dan Saito, 1975}) \quad (2 - 3)$$

Dimana :

H = Jumlah panas yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur penuangan; Btu (J)

C_s = *Weight specific heat* untuk logam padat; Btu/lbm – °F (J/g - °C)

T_m = Temperatur lebur logam; °F (°C)

T_o = Temperatur awal, biasanya temperatur ruang; °F (°C)

H_f = Panas fusi/lebur; Btu/lbm (J/g)

C_l = *Weight specific heat* untuk logam cair; Btu/lbm – °F (J/g - °C)

T_p = Temperatur penguapan; °F (°C)

V = Volume logam yang dipanaskan; in³ (cm³)

ρ = Densitas logam; lbm/in³ (g/cm³)

2.12 Hipotesis

Berdasarkan tinjauan pustaka maka dapat diambil hipotesis bahwa dengan proses *recycling* yang berulang-ulang menggunakan sistem *electrical furnace* dapat menyebabkan nilai kekerasan meningkat dan energi produksi yang dibutuhkan lebih kecil daripada menggunakan aluminium primer.

