BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Wahyudi (2009) menerangkan bahwa proses *remelting* mengakibatkan perubahan struktur mikro pada paduan Al-Si. Perubahan struktur mikro terjadi setelah piston bekas mendapat perlakuan *remelting* 1, *remelting* 2, dan *remelting* 3. Pada *remelting* 1 memperlihatkan fasa Si yang lebih besar. Selanjutnya pada *remelting* 2 memiliki fasa Si eutektik yang lebih banyak dan sebarannya lebih merata bila dibandingkan dengan proses *remelting* 1. Pada proses *remelting* 3, terlihat adanya perubahan bentuk Si eutektik (*flake*/serpih) yang lebih panjang dan lebih besar.

Raharjo (2011) menerangkan bahwa angka porositas semakin tinggi setelah dilakukan *remelting* yang semula 5,77% menjadi 34,97%. Salah satu penyebab terjadinya porositas adalah gas hidrogen. *Remelting* juga menyebabkan perubahan komposisi kimia material ADC 12 yang semula presentase Al = 84,68% dan Si = 11,0% menjadi Al = 85,33% dan Si = 10,5% pada temperatur penuangan 700^{o}C. Proses penuangan, pembekuan, dan cetakan yang digunakan juga mempengaruhi sifat mekanik material tersebut.

2.2 Aluminium

Aluminium ditemukan oleh Sir Humphrey dalam tahun 1809 sebagai suatu unsur, dan pertama kali direduksi sebagai logam oleh H. C. Oersted tahun 1825. Setelah itu pada tahun 1886, Paul Heroult di Perancis dan C. M. Hall di Amerika Serikat secara terpisah telah memperoleh logam aluminium dari alumina dengan cara elektrolisa dari garamnya yang terfusi yang dikenal dengan proses *Hall Heroult.* Penggunaan aluminium sebagai logam setiap tahunnya adalah pada urutan kedua setelah besi dan baja (Surdia dan Saito, 1999)

Aluminium merupakan logam yang paling banyak digunakan setelah baja. Karakteristik utamanya adalah ringan (berat jenis = 2,7 g/cm^3), memiliki konduktivitas panas dan listrik yang tinggi (237 W/mK dan 28,2 nΩ m), memiliki ketahanan korosi yang baik (3,91 mpy), serta memiliki keuletan yang cukup tinggi (90 Mpa untuk aluminium murni). Aluminium jauh lebih ringan jika dibandingkan dengan baja (berat jenis = 7,8 g/cm^3) (Sofyan, 2011).

Tahapan pembuatan aluminium dimulai dari pemrosesan bijih aluminium atau lebih dikenal dengan bauksit. Bauksit merupakan oksida dari aluminium dan terdapat dalam 2 bentuk, yaitu *carstic bauxite* dan *lateritic bauxite*. *Carstic bauxite* sebagian besar terdiri dari alumina monohidrat ($Al_2O_3.H_2O$), sedangkan *lateritic bauxite* sebagian besar terdiri atas alumina trihidrat ($Al_2O_3.3H_2O$). Di indonesia, bauksit banyak ditemukan di Pulau Bintan, Bangka dan Belitung, Sumatra.

Bauksit yang telah dimurnikan kemudian diolah untuk menjadi alumina murni melalui proses Bayer yang kemudian dilanjutkan dengan proses Hall-Heroult guna menghasilkan aluminium. Untuk menghasilkan 500 kg aluminium primer dengan proses Bayer dan Hall-Heroult, diperlukan 550 kg bauksit, 450 kg NaOH, 31,5 ton H_2O dan 7,5 ton uap. Bauksit juga dapat diolah dengan proses elektrolisa, untuk menghasilkan 1 kg aluminium diperlukan 4 kg bauksit, 0,6 kg karbon dan kriolit (Shakhashiri, 2008).

Aluminium murni mempunyai sifat mampu cor dan sifat mekanis yang jelek (Surdia dan Chijiwa, 2013). Oleh karena itu dipergunakan paduan aluminium karena sifat-sifat mekanisnya akan diperbaiki dengan menambahkan tembaga, silisium, magnesium, mangan, nikel, dan sebagainya. Coran paduan aluminium sifatnya ringan dan merupakan penghantar panas yang baik.

2.2.1 Karakteristik Aluminium

Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai ketahanan korosi dan hantaran listrik yang baik, serta sifat-sifat yang baik lainnya seperti penghantar panas yang baik, ringan, serta memiliki tingkat *machinability* yang baik dibanding baja dan besi cor. Dengan adanya penambahan unsur Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni, dan lain sebagainya dapat meningkatkan sifat mekaniknya. Penambahan unsur-unsur tersebut juga dapat memberikan sifat-sifat lain seperti ketahanan korosi, ketahanan aus, koefisien pemuaian yang rendah, dan sebagainya. Material ini digunakan dalam bidang yang luas diantaranya untuk peralatan rumah tangga, keperluan material pesawat terbang, mobil, kapal laut, konstruksi, dan lain-lain.

Aluminium didapatkan dalam keadaan cair melalui proses elektrolisa. Umumnya kemurnian aluminium mencapai 99,85% berat. Kemurnian 99,99% dapat diperoleh dengan cara mengelektrolisa ulang aluminium tersebut. Gelembung gas sangat mungkin berada di dalam aluminium dikarenakan proses peleburan dan pendinginan yang tidak sempurna,

kualitas cetakan yang buruk, serta bahan baku yang kurang baik (sebagian besar pada proses daur ulang aluminium). Berikut tabel 2.1 yang menjelaskan secara singkat sifat fisik dari aluminium murni.

Tabel 2.1. Sifat Fisik Aluminium Murni

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

Sumber : Surdia dan Saito, 1999

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

Tabel 2.2. Sifat Mekanik Aluminium

Sifat	Kemurnian Al (%)			
	99,996		< 99	
	Dianil	75% diroll 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, 1999

2.2.2 Klasifikasi Paduan Aluminium

Standar *Aluminium Association* (AA) menjelaskan bahwa terdapat dua kelas utama dalam pengelompokan paduan aluminium, yaitu aluminium tuang (*cast aluminium*) dan aluminium pengerjaan (*wrought aluminium*). Unsur paduan utama dalam aluminium tersebut yang mendasari penamaan kedua kelas diatas.

Tabel 2.3. Sistem Penamaan Paduan Aluminium berdasarkan *Aluminium Association*

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

Sumber : ASM Handbook Vol. 2, 2004

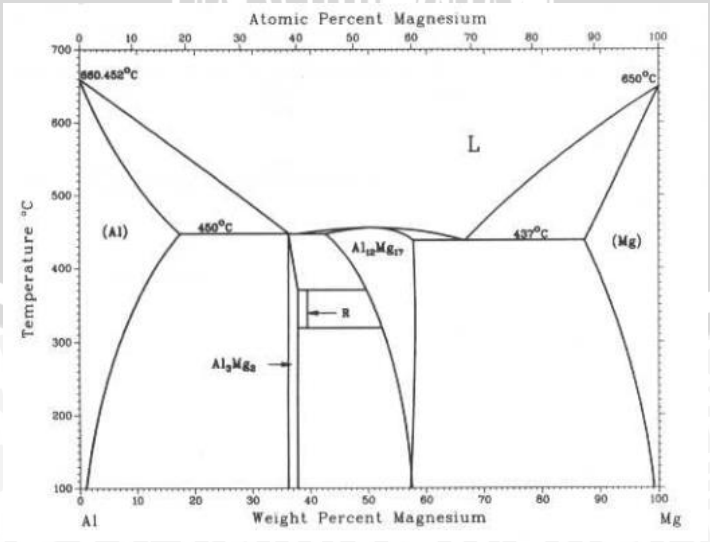
Seperti yang terlihat pada tabel 2.3, sistem penamaan paduan aluminium tuang menggunakan sistem registrasi 3 angka dengan urutan berdasarkan unsur paduannya. Tidak ada sistem penamaan paduan aluminium seri 6xxx dan 9xxx. Angka pertama menunjukkan kelompok paduan. Angka kedua dan ketiga menunjukkan jenis spesifikasi komposisi aluminium paduan tersebut. Biasanya diberikan angka keempat guna menyatakan bentuk

produk. 0 untuk spesifikasi coran, 1 untuk spesifikasi ingot, dan 2 untuk spesifikasi ingot yang lebih spesifik. Misal, xxx.0 mewakili batasan komposisi kimia dari paduan hasil pengecoran.

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

Paduan Al-Mg sering digunakan dalam industri perkapalan, pengolahan makanan dan juga bidang arsitektur (*architechtural trim*). Keunggulan utama dari paduan ini yakni tahan terhadap korosi air laut. Paduan Al-Mg juga memiliki *machinability* yang baik dan akan memberikan memberikan penampilan yang menarik ketika diberikan perlakuan *anodizing*. Kelemahan dari paduan ini adalah cenderung mudah mengikat oksida pada kondisi cair, sehingga sering menimbulkan inklusi oksida (ASM Handbook Vol 2, 2004).

Penambahan Mg mengakibatkan peningkatan laju pengintian γ-Al_2O_3 yang berakibat pada penurunan suhu rekristalisasi dari γ-Al_2O_3. Pengendapan dari MgO muncul pada antarmuka oksida dan logam. Peningkatan dari Mg pada paduan dapat meningkatkan laju oksidasi dan pengendapan dari $MgAl_2O_4$ dapat terjadi tergantung dari konsentrasi Mg dalam paduan (Totten, 2003). Diagram paduan Al-Mg dapat dilihat pada gambar 2.1 :



Gambar 2.1 Diagram Paduan Al-Mg
Sumber : ASM Handbook Vol. 3, 2004

2.2.3 Aluminium Daur Ulang (*Secondary Aluminium*)

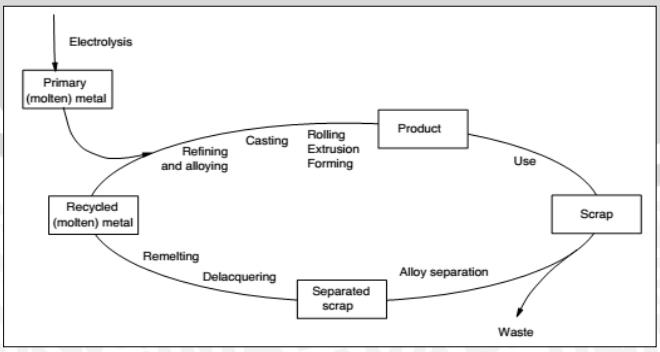
Secondary aluminium dengan cara *remelting* dapat meminimalisir penggunaan *raw material* serta dapat menghemat energi. Produksi aluminium daur ulang dapat menggantikan aluminium primer dengan efisiensi pendapatan sampai dengan 95% (Totten, 2003).

Aspek positif lainnya dari aluminium daur ulang adalah efek terhadap lingkungan. Produksi dari satu ton aluminium primer membutuhkan sekitar 4 ton bauksit dan proses tersebut menghasilkan sekitar 2 ton lumpur merah. Selain menghasilkan lumpur merah, produksi aluminium primer juga melepas florida ke lingkungan. Pertambangan bauksit juga merusak lingkungan karena memerlukan lahan yang luas.

Aspek metalurgi dari aluminium daur ulang dapat dibedakan menjadi dua kelompok utama, yaitu peleburan skrap dan pemrosesan dross putih. Dross dihasilkan selama proses peleburan aluminium. Dikarenakan tingginya reaktivitas aluminium terhadap oksigen, maka muncul lapisan oksida. Lapisan ini menjadi batas antara lelehan aluminium dengan atmosfer oksida yang mana melindungi aluminium terhadap oksidasi.

2.2.4 *Remelting* Aluminium

Proses *remelting* pada aluminium hanya membutuhkan 5% dari energi yang dibutuhkan untuk memproduksi aluminium primer (Farner, 2000). Proses ini juga lebih mudah jika dibandingkan dengan produksi aluminium primer. Pasokan skrap aluminium meningkat dalam beberapa tahun ini, sehingga daur ulang aluminium sangat diperlukan. Meskipun aluminium daur ulang disebut dengan *secondary aluminium*, bukan berarti aluminium daur ulang tidak lebih baik dari aluminium primer.



Gambar 2.2 Siklus Peleburan Aluminium
Sumber : Farner, 2000

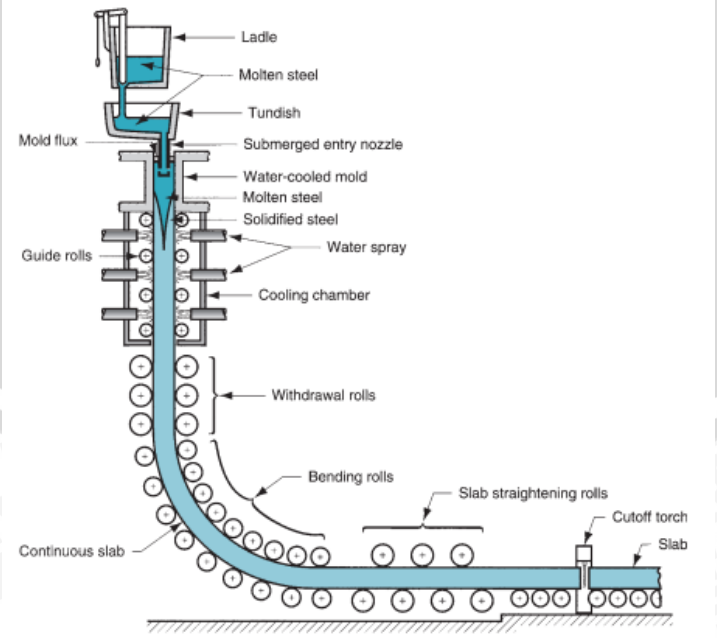
Pada dasarnya, proses *remelting* adalah proses peleburan dan penuangan kembali material yang sudah dilebur sebelumnya. Farner (2000) menyebutkan bahwa *remelting* merupakan salah satu siklus dari peleburan aluminium. Hal ini dikarenakan setelah produk aluminium digunakan, ada dua kemungkinan yaitu antara dibuang atau didaur ulang dengan cara *remelting* itu sendiri.

2.3 Proses Produksi Logam

2.3.1 Peleburan Logam

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

Suhu peleburan mengacu pada masing – masing suhu cair *(melting point)* unsur apabila menggunakan logam murni atau garis *liquidus* apabila paduan logam. Untuk menentukan suhu cair suatu paduan logam menggunakan diagram fasa dari paduan itu sendiri, dimana kita harus mengetahui kadar / prosentase dari masing-masing unsur dalam paduan terlebih dahulu.



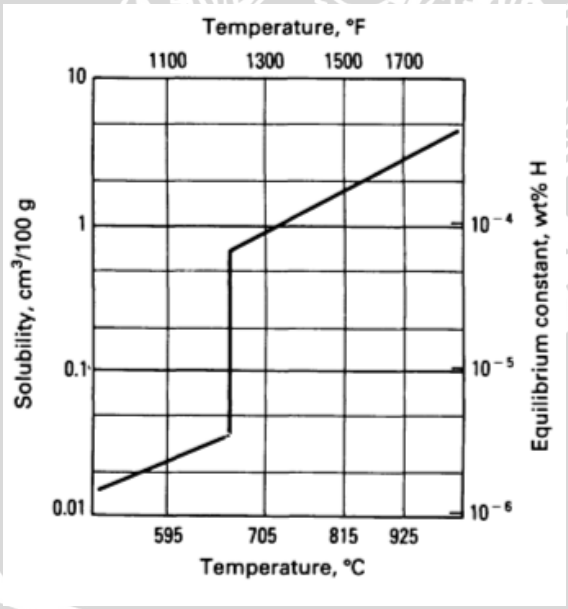
Gambar 2.3 Skema Peleburan dan Pengecoran Logam Secara Kontinyu
Sumber : Groover, 2010

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

Pada peleburan aluminium, hanya sedikit hidrogen yang diserap dari atmosfer. Sumber utaman hidrogen didalam Al adalah uap air, uap panas, atau hasil dari reaksi kimia sebagai berikut :

$$3H_2O + 2Al = 6H + Al_2O_3$$

Grafik di bawah ini memperlihatkan betapa cepatnya kandungan hidrogen naik ketika temperatur aluminium cair naik. Paduan yang mengandung hidrogen ± 0,01 cm^3/100 gram relatif bebas dari porositas.



Gambar 2.4 Pengaruh temperatur terhadap kelarutan hidrogen dalam aluminium
Sumber: ASM Handbook Vol. 15, 2002

Ketika temperatur logam cair turun, gas hidrogen akan terdesak keluar dengan cepat dan ini menyebabkan terjadinya porositas. Penambahan unsur paduan dalam logam alumunium, dapat merubah kelarutan gas hidrogen. Beberapa unsur paduan yang dapat

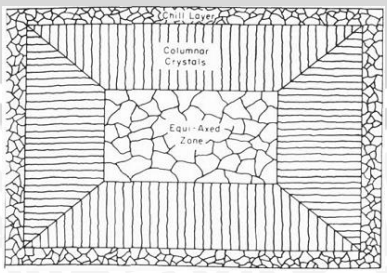
menurunkan kelarutan gas hidrogen, diantara: Si, Zn, Cu, dan Mn. Sedangkan unsur paduan lainnya yang dapat menaikan kelarutan gas hidrogen, diantaranya: Mg, Fe, Ni, dan Li. Dari faktor tersebut diatas maka penambahan unsur paduan merupakan hal penting dalam proses pengecoran, khususnya pada cairan logam alumunium paduan.

2.3.2 Solidifikasi

Setelah logam cair dituang ke dalam cetakan, terjadi proses solidifikasi logam. Awal solidifikasi (*solid-liquid*) bergerak menuju logam cair, sehingga solidifikasi logam terbentuk dari dinding cetakan sampai ke tengah-tengah dari logam cair (Kalpakjian, 1990). Proses ini sangat menentukan dalam hal ukuran, bentuk, homogenitas, dan komposisi kimia butiran yang terbentuk pada saat pengecoran.

Dalam proses solidifikasi logam cair, mula-mula tumbuh inti-inti kristal. Kemudian kristal-kristal tersebut tumbuh di sekeliling inti, dan disusul tumbuhnya inti-inti lain. Pada akhirnya, seluruhnya ditutupi oleh butir kristal sampai logam cair habis. Hal ini mengakibatkan seluruh bagian logam menjadi suatu susunan butir dan batas butir. Ukuran butir kristal tergantung pada laju pengintian dan pertumbuhan inti. Ketika laju pertumbuhan lebih besar dari laju pengintian, maka didapatkan butiran yang besar demikian sebaliknya.

Struktur yang terbentuk pada saat solidifikasi logam ditunjukkan pada gambar 2.5. Temperatur cetakan lebih rendah dibandingkan logam cair, sehingga membuat logam dingin dengan cepat dan membentuk lapisan solidifikasi. Butiran tumbuh dengan arah berlawanan dengan panas yang keluar dari cetakan. Butiran yang terbentuk saat terjadi perambatan panas ini disebut butiran *columnar*. Butiran yang memiliki arah yang berbeda, terhalang oleh pertumbuhan butir yang lainnya sehingga membentuk butiran *equiaxed*.

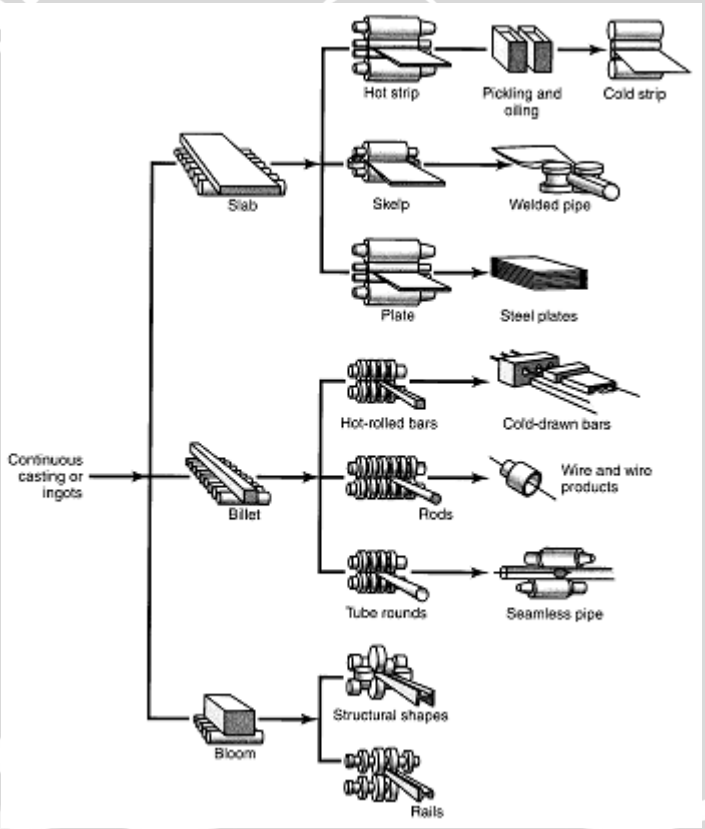


Gambar 2.5 Struktur logam yang terbentuk pada saat solidifikasi
Sumber : Davies, 1973

2.3.3 Proses Pengerolan dan Pemotongan

Setelah melewati proses solidifikasi, dilakukan proses pengerolan dan pemotongan guna mendapatkan ukuran yang diinginkan. Pengerolan merupakan proses mereduksi ketebalan maupun maupun merubah penampang dari benda kerja yang memanjang dengan penekanan yang berasal dari rol itu sendiri. Proses ini menghasilkan tiga jenis hasil pengecoran ingot yakni *bloom*, *billet*, dan *slab*.

Bloom memiliki penampang persegi dengan dimensi lebih dari 150x150 mm. *Billet* merupakan hasil rol dari *bloom*, memiliki penampang persegi dengan panjang sisi lebih dari 40 mm. Sedangkan *slab* adalah hasil dari pengerolan *ingot* atau *bloom*, memiliki penampang persegi panjang dengan dimensi lebar lebih dari 250 mm dan ketebalan lebih dari 40 mm.



Gambar 2.6 Skema proses pengerolan
Sumber : Kalpakjian, 2009

2.3.4 *Melt Cleanliness*

Melt cleanliness dapat diartikan sebagai banyak tidaknya inklusi dan juga hidrogen yang terlarut dalam logam cair. Apabila semakin banyak kandungan inklusi dari suatu

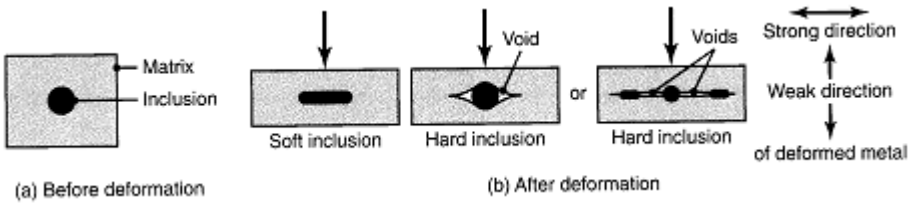
produk, maka *melt cleanliness* rendah, begitu pula sebaliknya. Hasil pengecoran aluminium paduan dengan kualitas yang terbaik digunakan sebagai komponen utama bidang otomotif dan penerbangan. Produk coran dalam bidang ini memerlukan jumlah inklusi dan porositas yang minimal (atau bahkan dihilangkan) guna menghindari pengaruh yang membahayakan terhadap sifat mekaniknya.

Kualitas dari logam dapat didefinisikan sebagai keakuratan komposisi kimia, jumlah inklusi dan porositas di dalam logam, keadaan permukaan permukaan dan konsistensi (Kauffmann, 2007). Standar internasional tersedia untuk komposisi kimia dari suatu paduan, akan tetapi tidak terdapat standar untuk kualitas permukaan dan *melt cleanliness*. Pengukuran konsistensi dari kualitas leleh dan keberhasilan proses perlakuan leleh menghasilkan kualitas coran yang baik (Neff, 2004).

2.3.5 Inklusi

Inklusi merupakan zat pengotor yang tidak diinginkan dalam suatu material, terutama dalam paduan aluminium tuang. Inklusi yang biasa terjadi pada paduan aluminium adalah karbida (Al_3C_4, TiC), oksida (Al_2O_3, MgO), atau fasa intermetalik ($MnAl_3$, $FeAl_3$). Inklusi itu sendiri dapat mengakibatkan menurunnya ketahanan *fatigue* dan kekuatan material, serta dapat juga meningkatkan porositas serta korosi.

Batas butir merupakan lokasi yang diduga paling sering terbentuk lapisan oksida. Hal ini disebabkan pada saat dendrit tumbuh tidak dapat menembus lapisan tersebut dikarenakan tertahan oleh lapisan udara tersebut. Totten (2003) menerangkan bahwa sekitar 80% dari pengecoran skrap aluminium menghasilkan retak karena oksida selama proses pengisian cetakan. Munculnya lapisan oksida menurunkan umur *fatigue* dari komponen aluminium.



Gambar 2.7 Pengaruh inklusi pada material : (a) Sebelum deformasi (b) Setelah deformasi
Sumber : Kalpakjian, 2009

Gambar 2.7 menyatakan tentang pengaruh inklusi terhadap terbentuknya retakan diawali dengan adanya lubang di sekitar inklusi setelah dikenakan deformasi. Jenis inklusi yang sering dijumpai pada paduan aluminium adalah fasa intermetalik. Fasa intermetalik merupakan fasa kedua yang mengendap pada struktur mikro paduan aluminium sebagai akibat dari kadar berlebih yang melebihi batas kelarutannya.

Kecepatan pembekuan adalah salah satu faktor yang mempengaruhi ukuran, bentuk, dan distribusi fasa intermetalik. Fasa intermetalik yang kasar dan terjadinya konsentrasi fasa kedua pada batas butir terbentuk akibat dari kecepatan pembekuan yang lambat. Sebaliknya, kecepatan pembekuan yang cepat akan menghasilkan partikel yang lebih halus dan terdispersi merata.

Berikut ini beberapa inklusi yang sering terjadi pada aluminium :

Tabel 2.4. Inklusi pada Aluminium

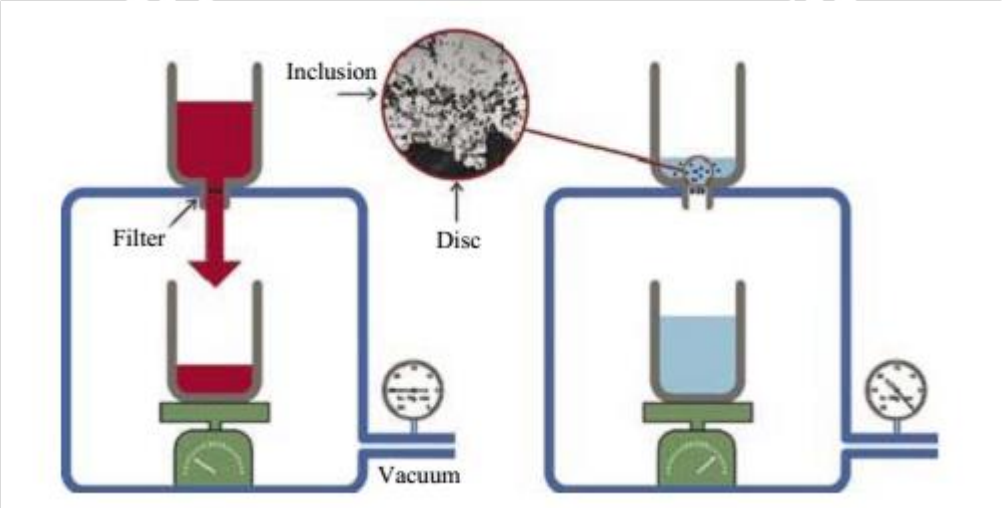
Jenis Partikel	Fase Partikel dan Sumbernya	Bentuk Partikel	Ukuran (diameter) dalam skala mikron
Oksida	Al_2O_3 dari hasil oksidasi permukaan leleh	Lapisan atau beberapa lapisan	10 - 1000
	Al_2O_3 dari ketidaklarutan	Partikel poligonal	10 - 20
	Al_2MgO_4 dari hasil oksidasi permukaan leleh	Partikel piramida Lapisan tebal	0,1 - 5
	MgO dari hasil oksidasi permukaan leleh atau paduan tambahan	Lapisan partikel Partikel poligonal	1 - 100 0,2 - 1 10 - 1000
	Tembok refraktori (Al, Si, O)	Tonjolan atau partikel	10 - 500
Karbida	Al_4C_3 dari proses Hall-Heroult	Piringan segiempat atau heksagonal	0,5 - 25
Borida	TiB_2, VB dari proses Hall-Heroult	Piringan segiempat atau heksagonal	1
	TiB_2 dari *grain refiner*	Piringan heksagonal	1 - 3 1 - 50
Garam	Kriolit (Na_3AlF_6) dari proses Hall-Heroult Klorida Mg/Al dari fluks gas Cl_2 atau fluks dross Klorida Na/K dari fluks dross	Sekelompok piringan berbentuk bola	10 - 20

Sumber : Totten, 2003

2.3.6 Pengujian Inklusi

2.3.6.1 PoDFA (*Porous Disk Filtration Apparatus*)

PoDFA (*Porous Disk Filtration Apparatus*) merupakan salah satu cara untuk mengetahui inklusi dan juga *melt cleanliness* pada logam cair. Analisa metalografi diperlukan dalam menentukan adanya inklusi pada filter keramik yang digunakan untuk memisahkan antara logam cair dan pengotor. Mekanismenya adalah logam cair dialirkan dengan penekanan melalui filter berpori halus. Secara otomatis inklusi akan terkonsentrasi pada permukaan dari filter tersebut dan dapat diamati dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*). *Melt cleanliness* dari logam ditentukan dengan melihat area "cake" pada material tersebut (Wannasin, 2007).



Gambar 2.8 Skema Pengujian PoDFA
Sumber : Djurdjevic, 2010

Jumlah inklusi total dari material uji dapat dipresentasikan dengan rumus berikut :

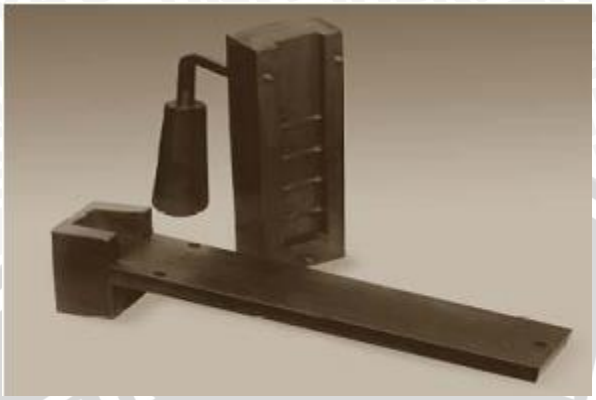
$$\text{Inklusi total } \left(\frac{\text{mm}^2}{\text{kg}}\right) = \frac{\text{luasan rata-rata residu } (\text{mm}^2) \text{ x luas fraksi inklusi}}{\text{massa dari logam yang disaring (kg)}} \qquad (2\text{-}1)$$

2.3.6.2 *K-Mold Test*

Cetakan *K-Mold* pertama kali ditemukan oleh Sanji Kitaoka di Jepang tahun 1973. Tujuan dari alat ini adalah untuk mengetahui *macro cleanliness* (kebersihan secara makro) dari aluminium cair. Keuntungan dari alat ini adalah :

1. Pengamatan dan pengoperasian yang mudah
2. Sensitif terhadap adanya inklusi dan lapisan oksida

3. Harga relatif terjangkau
4. *Portable* (Mudah dibawa)



Gambar 2.9 Cetakan *K-Mold*
Sumber : Djurdjevic, 2010

Prosedur penelitian dari alat ini sangat mudah. Sekitar 400 g dari logam cair dituang ke dalam cetakan yang telah dipanaskan sebelumnya. Setelah beberapa saat, logam cair akan menjadi padatan serupa batang dengan ukuran 240 x 36 x 6 mm. Kemudian spesimen dipatahkan menjadi beberapa bagian dan penampang patahan disusun menjadi satu dengan kondisi seperti gambar 2.10 di bawah ini. Setelah itu patahan tersebut diamati dengan perbesaran tertentu. Proses solidifikasi yang cepat menghasilkan produk dengan matriks yang sangat halus sehingga inklusi dapat terlihat pada permukaan patahan.

Gambar 2.10 Sampel pada Pengujian *K-Mold*
Sumber : Djurdjevic, 2010

Kebersihan leleh ditunjukkan dengan nilai *K-mold*. Nilai ini didasari oleh inspeksi secara visual pada permukaan spesimen dan dengan menghitung jumlah inklusi pada permukaan patah. Semakin rendah niklai *K-mold*, maka semakin bersih lelehan logam tersebut. Nilai *K-mold* ditunjukkan oleh rumus berikut :

$$K = \frac{S}{n} \qquad (2\text{-}2)$$

dengan :

K = Nilai inklusi yang ditemukan pada satu sampel

S = Jumlah total dari inklusi yang ditemukan pada n-spesimen

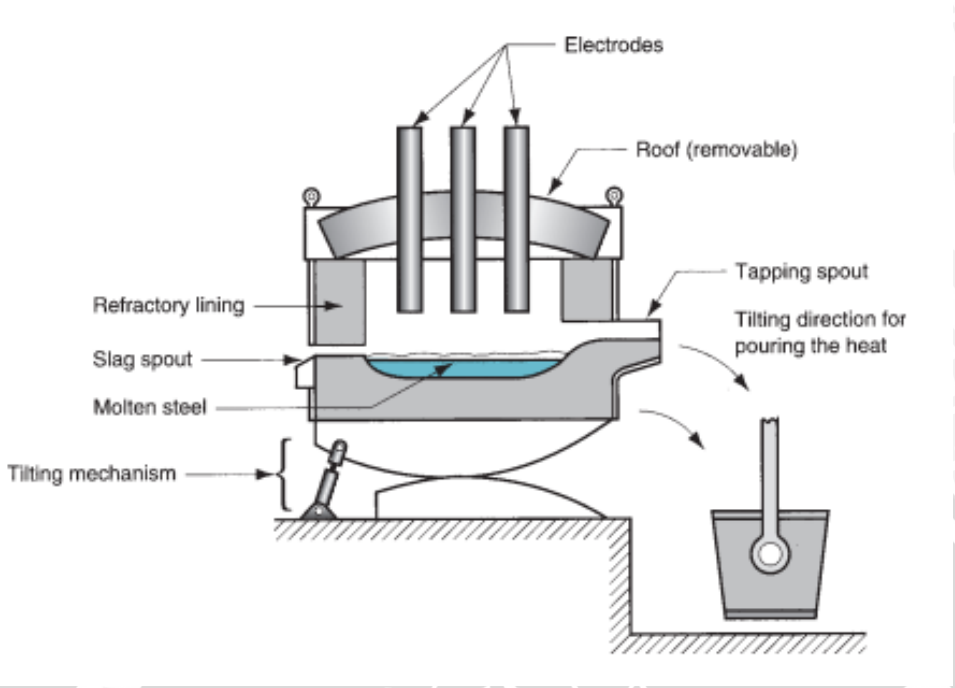
n = Jumlah sampel yang diamati

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*.

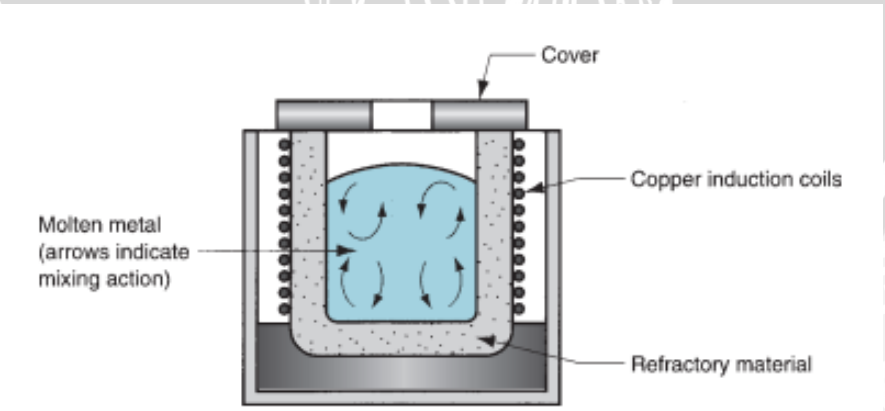
Salah satu kelebihan *electrical furnace* dari *basic oxygen furnace* adalah kemampuan untuk mengolah scrap menjadi 100% material cair. Kapasitas produksinya dapat mencapai 400 ton. *Electrical furnace* memiliki bentuk fisik yang cukup rendah sehingga dalam hal pengisian bahan baku sangat mudah. Dalam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



Gambar 2.11 *Electrical Furnace*
Sumber : Groover, 2010

2.4.2 *Induction Furnace*

Pada dapur induksi, material logam dilebur menggunakan arus bolak balik (*alternating current*) yang mengalir melalui kumparan atau koil guna menghasilkan medan magnet pada logam. Sebagai hasilnya, arus induksi mengakibatkan pemanasan secara cepat dan lelehnya material. Gaya elektromagnet mengakibatkan aksi pengadukan pada logam cair yang dapat dilihat pada Gambar 2.12. Dikarenakan logam tidak kontak langsung dengan elemen pemanas, lingkungan disekitar dapat dikontrol secara ketat.

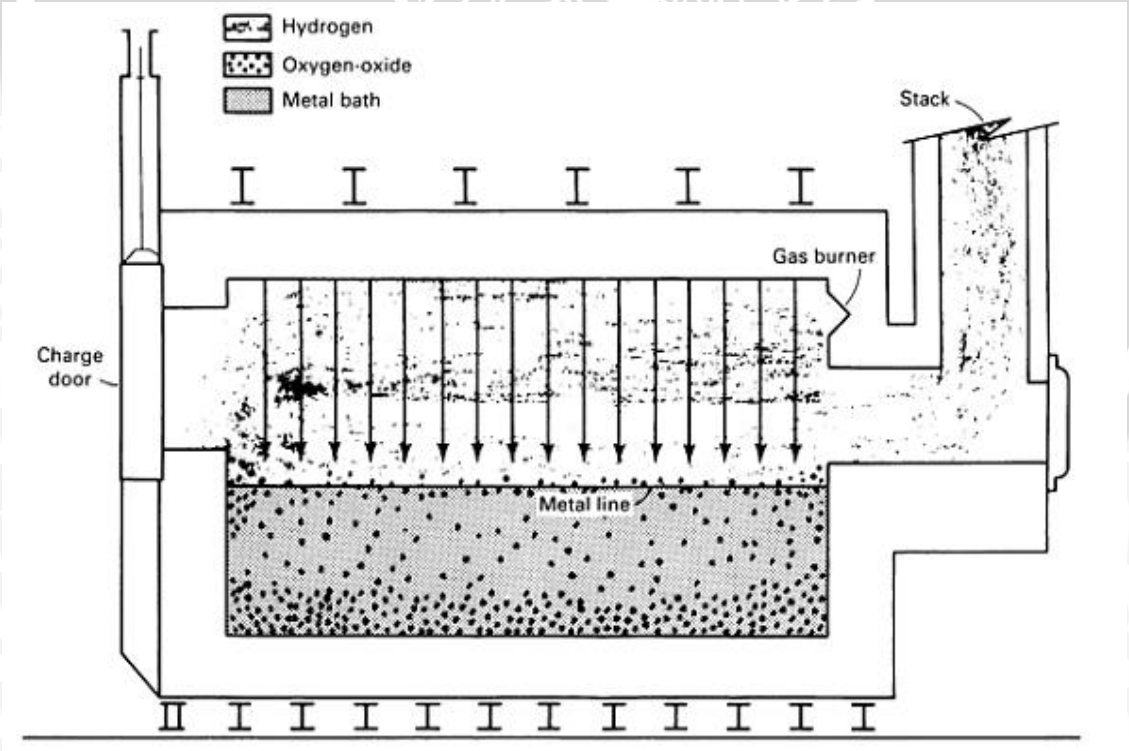


Gambar 2.12 *Induction Furnace*
Sumber : Groover, 2010

2.4.3 *Reverberatory Furnace*

Tungku *reverberatory* secara luas digunakan untuk meleburkan *ferrous* dan *non-ferrous alloy*. *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 (s*tack*). 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.



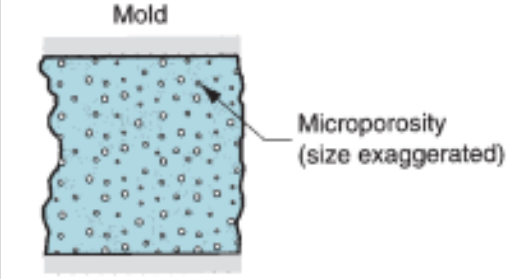
Gambar 2.13 *Reverberatory Furnace*
Sumber : ASM Handbook Vol. 15

2.5 Porositas

Porositas pada proses pengecoran dapat diakibatkan oleh penyusutan dan juga gas yang terlarut. Daerah berpori dapat terbentuk karena penyusutan dari logam saat solidifikasi. Daerah yang tipis pada proses pengecoran lebih cepat menjadi padat daripada daerah yang tebal. Hasilnya, logam cair mengalir menuju daerah yang lebih tebal yang belum tersolidifikasi secara sempurna.

Porositas gas merupakan salah satu masalah yang serius dalam pengecoran besi, aluminium, dan tembaga. Porositas gas pada umumnya disebabkan oleh perubahan gas selama proses pengecoran dan solidifikasi. Gas tersebut dapat terbentuk dari reaksi antara cetakan pasir maupun cetakan logam yang mengakibatkan gas terlarut dalam logam cair sewaktu solidifikasi. Salah satu penyebab utama lainnya adalah perubahan dari gas terlarut yang terbentuk selama pengecoran.

Sebagai contoh, besi cor cair mungkin dapat melarutkan hidrogen dan nitrogen. Kelarutan dari gas pada kondisi solid mungkin lebih sedikit daripada pada kondisi cair, dan memungkinkan gas yang ada berubah selama solidifikasi. Porositas dapat menurunkan kesempurnaan geometri dari produk dan juga dapat mempengaruhi massa jenis. Hal ini dikarenakan porositas berbentuk gelembung udara di dalam produk coran.



Gambar 2.14 *Microporosity*
Sumber : Kalpakjian, 2009

Faktor-faktor penting yang berhubungan dengan pembentukan porositas gas antara lain ialah :

- Unsur-unsur gas atau sumber gas yang terkandung dalam paduan.
- Tekanan udara yang berlebih.
- Temperatur cetakan.
- Teknik dan kondisi peleburan.

- Temperatur logam cair.
- Permeabilitas cetakan.
- Bentuk saluran penuangan ataupun kecepatan penuangan

Perhitungan prosentase porositas yang terjadi dapat dihitung dengan perbandingan densitas sampel atau *apparent density* dengan densitas teoritis atau *true density* (Taylor, 2000), yaitu:

$$\% P = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_{th}}\right) x\ 100\% \qquad (2\text{-}3)$$

dengan :

%P = Prosentase porositas

ρ_s = Densitas sampel atau *Apparent Density* (gr/cm^3)

ρ_{th} = Densitas teoritis atau *True Density* (gr/cm^3)

2.6 Densitas

Densitas dari suatu material adalah sebuah ukuran massa per unit volume. Densitas disimbolkan ρ (Greek: rho), dan satuannya adalah gr/cm^3. Densitas dari sebuah elemen ditentukan dari nomor atom dan faktor lainnya seperti radius atom dan juga susunan atom. Densitas juga ada hubungannya dengan *strength to weight ratio*, yakni kekuatan tarik dibagi dengan densitas material. Di bawah ini rumus dari densitas :

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (2\text{-}4)$$

dengan :

ρ = Densitas (gr/cm^3)

m = massa total benda (gr)

V = volume benda (cm^3)

Dalam perhitungan porositas menggunakan perbandingan antara dua macam densitas, yaitu *True Density* dan *Apparent Density*.

- *True density*

True Density merupakan kepadatan pada benda tanpa adanya porositas didalamnya. Dapat didefinisikan sebagai perbandingan massa terhadap volume sebenarnya (gr/cm^3). Rumus dari *true density* menurut ASTM E 252-84 yaitu :

$$\rho_{th} = \frac{100}{\left\{\left(\%Al/\rho_{Al}\right)+\left(\%Cu/\rho_{Cu}\right)+\left(\%Fe/\rho_{Fe}\right)+etc.\right\}} \qquad (2\text{-}5)$$

dengan :

ρ_{th} = Densitas teoritis atau *True Density* (gr/cm^3).

ρ_{Al}, ρ_{Cu}, ρ_{Fe}, *etc* = Densitas unsur (gr/cm^3)

%Al, %Cu, *etc* = Prosentase berat unsur (%).

- *Apparent density*

Menyatakan berat setiap unit volume material termasuk cacat yang terdapat pada material yang akan diuji (gr/cm^3). Rumus apparent density menurut ASTM B 311-93 adalah sebagai berikut:

$$\rho_s = \rho_w \frac{W_s}{W_s-(W_{sb}-W_b)} \qquad (2\text{-}6)$$

dengan :

ρ_s = Densitas sampel atau *Apparent Density* (gr/cm^3).

ρ_w = Densitas air (gr/cm^3).

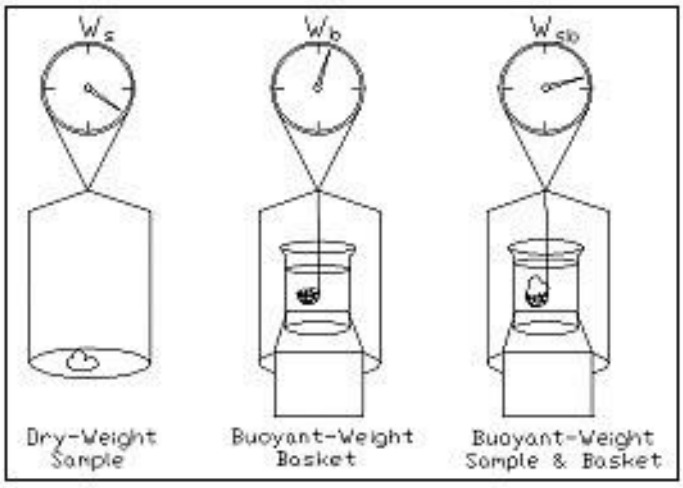
W_s = Berat sampel di luar air (gr)

W_b = Berat keranjang di dalam air (gr)

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

2.7 Piknometri

Piknometri adalah pengujian massa jenis dengan cara membandingkan massa sampel di udara dengan massa sampel di dalam air. Hasil dari pengujian ini akan diolah sesuai pada persamaan *aparent density* dan di dapat nilai dari *apparent density*.



Gambar 2.15 Skema Piknometri
Sumber : Taylor, 2000

Sesuai yang di tunjukkan pada gambar 2.15 diatas pengujian piknometri dilakukan dengan melakukan tiga pengukuran berat, yaitu:

Ws = pengukuran berat sampel di udara (*dry weight*)

Wsb = pengukuran berat apung dan keranjang dan sampel

Wb = pengukuran berat apung keranjang.

Pengukuran di lakukan dengan menggunakan timbangan yang di hubungkan pada suatu keranjang agar mudah dalam menempatkan sampel dan memanfaatkan bejana yang berisi air untuk mengetahui berat sampel dan keranjang dalam air.

2.8 Hipotesa

Berdasarkan tinjauan pustaka maka dapat diambil hipotesa pada pengulangan pengecoran daur ulang (*recycling*) aluminiun struktur menggunakan *electric furnace*, dengan semakin banyak pengulangan *recycling* akan menambah persentase porositas dan juga menimbulkan peningkatan inklusi dikarenakan perubahan struktur dari aluminium paduan.