

2. TEORI DASAR

2. Pengecoran Logam.

2.1 Sejarah Pengecoran.

Coran dibuat dari logam yang dicairkan, kemudian dituang ke dalam cetakan, dan dibiarkan membeku dan mendingin. Oleh karena itu sejarah pengecoran dimulai ketika orang mengetahui bagaimana mencairkan logam dan bagaimana membuat cetakan. Hal itu terjadi kira-kira pada tahun 4000 sebelum masehi [2].

Awal penggunaan logam oleh orang ialah ketika orang membuat perhiasan emas dan perak tempaan, dan kemudian membuat senjata atau mata bajak dengan menempa tembaga. Hal ini dimungkinkan sebab logam ini didapat dari alam dalam keadaan murni sehingga memudahkan untuk menempanya. Dari sinilah orang secara kebetulan menemukan tembaga mencair, selanjutnya mengetahui cara menuang logam cair tersebut ke dalam cetakan. Dan demikian orang mengetahui cara untuk membuat coran yang lebih rumit.

Kemudian ditemukan perunggu yaitu suatu paduan tembaga, timah dan timbal yang titik cairnya lebih rendah dari titik cair tembaga. Pengecoran perunggu ditemukan kira-kira 3000 tahun sebelum masehi di Mesopotamia yang kemudian diteruskan ke Asia Tengah, India dan China. Dan pada tahun 1500-1400 sebelum masehi, teknik pengecoran ini meyebar ke negara-negara Eropa.

Pada tahun 2700 sebelum masehi barulah ditemukan penempaan besi, dan pada tahun 800 sebelum masehi di China ditemukan pembuatan coran dari besi kasar yang mempunyai titik cair rendah dan mengandung fosfor tinggi dengan mempergunakan tanur beralas datar. Dan pada abad ke 14 barulah dilakukan pengecoran besi kasar secara besar-besaran. Pada pertengahan abad 19, sejak ditemukan tanur yakni pada jaman H.Bessemer atau W.Siemens dapat dibuat coran baja dari besi kasar.

Sedangkan untuk pengecoran coran paduan aluminum baru ditemukan pada akhir abad 19 setelah cara permurnian dengan metode elektrolisa ditemukan.

2.2 Macam-Macam Pengecoran

Pada masa sekarang ini telah banyak beberapa teknik pengecoran yang digunakan, tetapi pada dasarnya pengecoran terbagi sebagai berikut:

- Pengecoran cetak: merupakan pengecoran dimana logam cair ditekan ke dalam cetakan logam dengan tekanan tinggi. Coran tipis dapat dibuat dengan cara ini.
- Pengecoran tekanan rendah: adalah cara pengecoran dimana diberikan tekanan yang sedikit lebih tinggi dari tekanan atmosfer pada permukaan logam dalam tanur, tekanan ini mengakibatkan mengalirnya logam cair ke atas melalui pipa ke dalam cetakan.
- Pengecoran sentrifugal: suatu cara pengecoran dimana cetakan diputar dan logam cair dituangkan ke dalamnya, sehingga logam cair tertekan oleh gaya sentrifugal dan kemudian membeku. Coran berbentuk pipa dapat dibuat dengan jalan ini.
- Pengecoran cetak permanen: merupakan cara pengecoran yang paling umum digunakan. Dimana logam cair dituang ke dalam cetakan tanpa memberikan tekanan, dan logam cair ini mengalir ke dalam dengan gaya gravitasi.

2.3 Macam-macam tanur

Sampai saat ini tanur perapian terbuka (*Open Hearth Furnace*) banyak dipergunakan untuk peleburan logam cair baik itu besi maupun baja. Akan tetapi sekarang lebih banyak dipergunakan tanur listrik disebabkan karena biaya peleburan lebih murah. Peleburan dengan busur api listrik dibagi menjadi dua macam proses yaitu proses asam dan proses basa. Cara peleburan proses asam dipakai untuk peleburan skrap baja berkualitas tinggi sedangkan proses basa dipergunakan untuk peleburan skrap baja berkualitas biasa.

Tanur listrik Heroult adalah tanur yang paling banyak digunakan. Tanur ini mempergunakan arus bolak-balik tiga fasa. Energi panas yang diberikan oleh loncatan busur listrik antara elektroda karbon dan cairan baja. Terak menutupi cairan dan mencegah absorpsi gas dari udara luar selama pemurnian berjalan.

Dalam peleburan baja, disamping pengaturan komposisi kimia dan temperatur, perlu juga mengatur absorpsi gas, jumlah dan macam inklusi bukan

logam. Untuk menghilangkan gas, ditambahkan bijih besi atau tepung kerak besi selama proses reduksi. Disamping proses tersebut sekarang banyak dipergunakan proses pembuatan baja dengan oksigen. Keuntungan proses ini adalah:

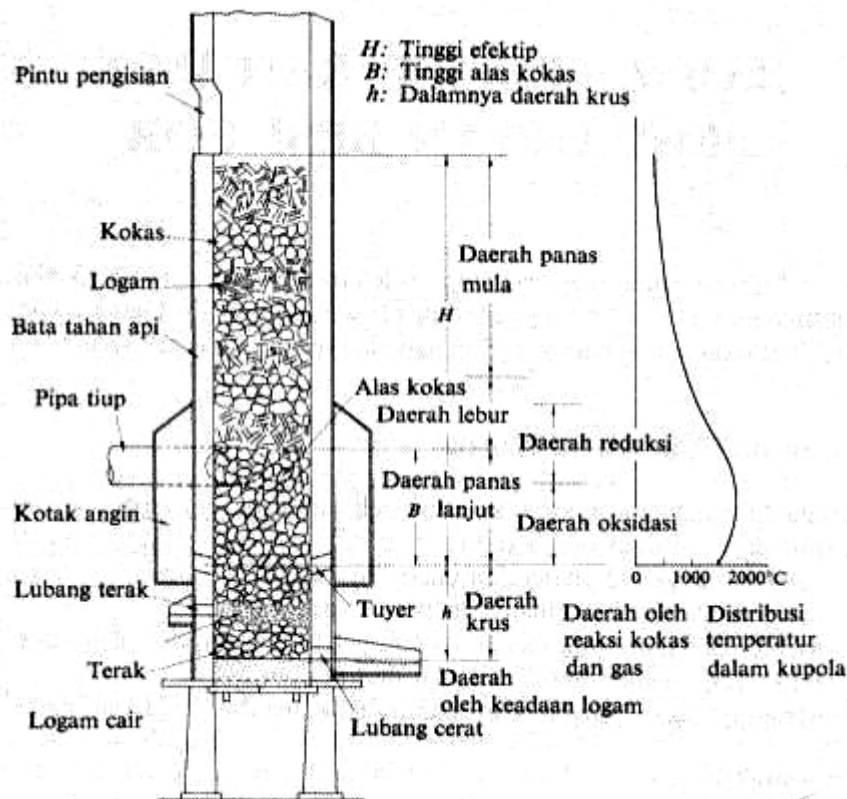
- Biaya peleburan yang rendah.
- Mudahna menaikkan temperatur cairan.
- Peningkatan kualitas dengan penghilangan gas.
- Mudah memproduksi baja karbon rendah.

Disamping tanur diatas, dapur kupola banyak dipergunakan untuk peleburan besi kasar menjadi besi cor. Dapur kupola ini mempunyai banyak keuntungan dibanding tipe lain, antara lain:

- Konstruksinya sederhana dan mudah pengoperasiannya.
- Memberikan kemungkinan peleburan secara kontinyu.
- Memungkinkan untuk mendapat laju peleburan yang besar untuk tiap jamnya.
- Biaya yang rendah untuk alat-alat dan peleburan.

Konstruksi kupola ini terbuat dari silinder baja yang tegak, yang dilapisi batu tahan api. Bahan baku logam dan kokas diisikan pintu pengisi. Udara ditiupkan ke dalam melalui tuyer, kokas terbakar dan bahan logam mencair. Logam cair dan terak dikeluarkan melalui lubang-lubang keluar pada dasar kupola. Jadi dalam kupola, logam dipanaskan langsung oleh panas pembakaran dari kokas dan mencair, oleh karena itu mempunyai efisiensi yang tinggi.

Dapur kupola dibuat dari selubung baja vertikal, dengan tebal antara 6-12 mm. Bagian pelapis biasanya tebal pada bagian bawah, terdapat pintu pengisian pada bagian atas, dimana temperatur bagian bawah lebih tinggi daripada temperatur bagian atas. Udara untuk pembakaran secara konstan diperoleh dari *blower*. Udara ini mengalir melalui pipa aliran menuju bagian yang disebut *tuyer*. *Tuyer* ini biasanya berjumlah 4, 6, atau 8 tergantung besar kecilnya ukuran dari kupola. Tinggi *tuyer* dari bagian dasar kupola berkisar 450-500mm. Pada bagian bawah dari kupola terdapat lubang pengeluaran dari logam cair. Di arah berlawanan dari lubang pengeluaran ini terdapat lubang untuk pengeluaran *slag* (lubang terak).

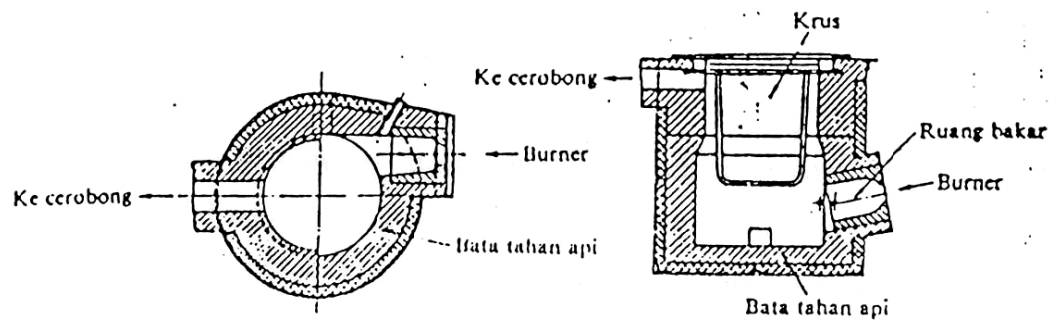


Gambar 2.1 Dapur Kupola[2]

Kemudian selanjutnya tanur yang sering dipergunakan untuk melebur aluminium adalah tanur krus. Tanur krus besi cor, tanur krus dan tanur krus nyala api dapat dipakai untuk mencairkan paduan aluminium cor, terutama untuk peleburan Al-7Si-0,3Mg. Paduan Al-Mg dipergunakan krus karbon, karena penambahan kadar besi memperburuk sifat mekanik dan ketahanan korosi.

Adapun cara yang dipergunakan untuk melebur aluminium paduan ini adalah sebagai berikut. Pertama bagian dalam tanur ini diisikan *ingot* aluminium paduan, kemudian barulah *burner* dinyalakan untuk membakar *ingot* tersebut.

Untuk menghemat waktu peleburan dan mengurangi kehilangan karena oksidasi, lebih baik melebur logam tersebut dalam potongan-potongan kecil yang kemudian dilakukan pemanasan mula. Jika logam sedikit mencair, pada permukaan logam cair terdapat *slag*, oleh karena itu harus diambil supaya tidak tercampur pada waktu penuangan logam cair tersebut kedalam cetakan.



Gambar 2.2 Tanur Krus [2]

2.4 Logam Aluminium

Aluminium merupakan unsur yang paling banyak terdapat di bumi, tetapi ia merupakan logam yang relatif baru, karena teknologi untuk memurnikannya dari oksidanya baru saja ditemukan. Di alam, aluminium berupa oksida dan ini sangat stabil sehingga tidak dapat direduksi dengan cara seperti mereduksi logam lainnya. Pereduksian aluminium hanya dapat dilakukan dengan cara elektrolisis.

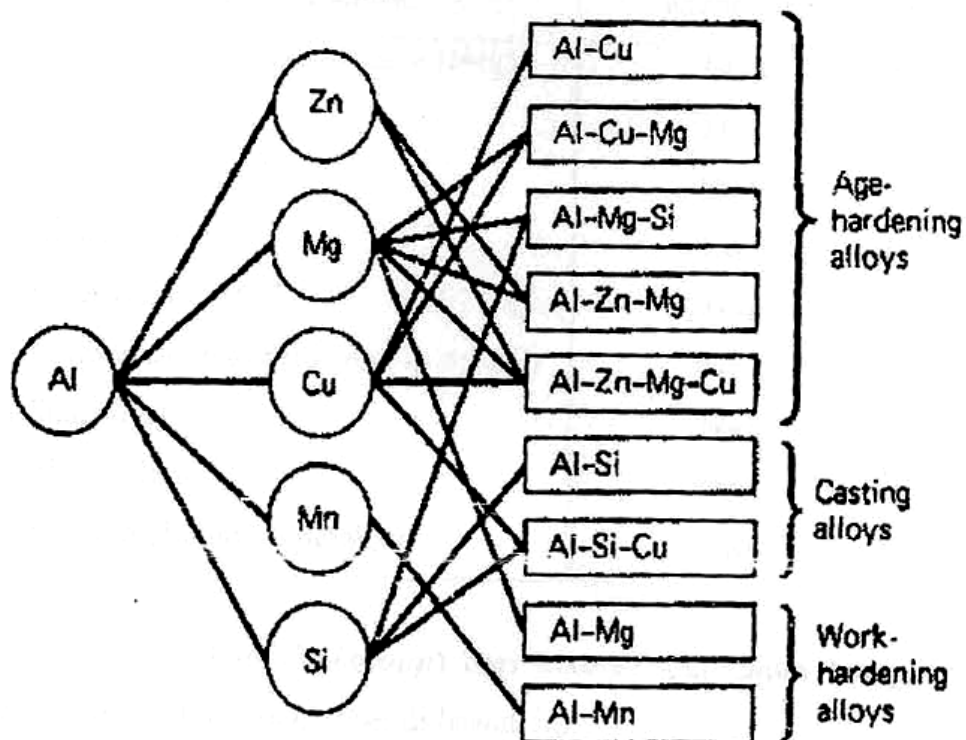
Sifat-sifat penting yang menyebabkan dipilihnya aluminium adalah ringan, tahan korosi, penghantar panas dan listrik yang sangat baik. Berat jenisnya hanya $2,7 \text{ Mg/m}^3$, sehingga walaupun kekuatannya rendah tapi *strength to weight ratio* nya masih lebih tinggi daripada baja. Oleh karena itu, aluminium banyak digunakan pada konstruksi yang memiliki sifat ringan seperti alat-alat transportasi, pesawat terbang dan lain-lain. Sifat tahan korosi aluminium diperoleh dari terbentuknya lapisan oksida aluminium dari permukaan aluminium. Lapisan oksida ini melekat pada permukaan dengan kuat dan rapat serta stabil (tidak bereaksi dengan lingkungannya) sehingga melindungi bagian dalam. Adanya lapisan oksida ini satu pihak dapat mengakibatkan tahan korosi tetapi di lain pihak menyebabkan aluminium sukar dilas dan disolder.

Aluminium yang terdapat pada pasaran selalu mengandung *impurity* ($\pm 0,8\%$), biasanya besi, silikon, tembaga dan lain-lain. Adanya *impurity* ini dapat menyebabkan penurunan sifat penghantaran listrik dan panas tetapi dapat menaikkan kekuatan aluminium hampir dua kalinya. Kekuatan dan kekerasan aluminium memang tidak terlalu tinggi, akan tetapi dapat diperbaiki dengan *heat treatment* dan pemuatan. Keburukan yang paling serius dilihat dari segi teknik

adalah sifat elastisitasnya yang sangat rendah, hampir tidak dapat diperbaiki baik cara pemaduan maupun *heat treatment*.

2.4.1 Paduan Aluminium

Dalam keadaan murni aluminium terlalu lunak atau lemah, terutama kekakuannya sangat rendah untuk keperluan teknik. Dengan pemaduan sifat, sifat aluminium dapat diperbaiki tetapi seringkali sifat tahan korosinya berkurang demikian juga keuletannya. Dengan menambah sedikit mangan, silikon, atau magnesium tidak banyak menurunkan sifat tahan korosinya, tetapi unsur seng, besi, timah putih dan tembaga cukup drastis menurunkan sifat tahan korosinya.



Gambar 2.3 *Flow-chart* Macam Penggunaan Paduan Aluminium[1]

Paduan aluminum dapat digolongkan menjadi:

1. *Aluminium Wrought Alloy*
2. *Aluminium Casting Alloy*

Aluminum Wrought Alloy, berupa barang setengah jadi misalnya batang, plat dan lain-lain, dapat diklasikasi menurut komposisi kimianya. Tiap-tiap jenis paduan diberi kode 4 digit (angka). Digit pertama menunjukkan jenis paduan aluminium berkaitan dengan kemurnian aluminium atau jenis unsur paduan utama. Digit kedua menunjukkan modifikasi dari paduan orisinil atau batas *impurity*. Digit 0 untuk paduan orisinil dan digit 1 sampai 9 untuk modifikasi.

Sistem penomoran pada aluminium tuang (*casting alloys*) menggunakan 3 (tiga) digit ditambah 1 (satu) digit yang terpisah oleh tanda titik. Digit pertama mengidentifikasikan kelompok (*group*) dari paduan, kedua digit selanjutnya menunjukkan kemurnian dari aluminium tersebut, sedangkan digit terakhir yang terpisah oleh tanda titik mengidentifikasikan bentuk dari produk apakah dalam bentuk produk cor atau masih dalam bentuk ingot. Adapun kelompok (*group*) dari paduan aluminium tempa (*wrought alloys*) dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2.1 Sistem Penomoran Paduan Aluminium Tempa (*Wrought Alloys*) [1]

Elemen Paduan	Kelompok
Aluminium (min. 99% atau lebih)	1xxx
Tembaga (Cu)	2xxx
Mangan (Mn)	3xxx
Silikon (Si)	4xxx
Magnesium (Mg)	5xxx
Magnesium dan Silikon (Mg dan Si)	6xxx
Seng (Zn)	7xxx
Elemen lain	8xxx
Seri yang belum digunakan	9xxx

Adapun kelompok (*group*) dari paduan aluminium tuang (*casting alloys*) dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

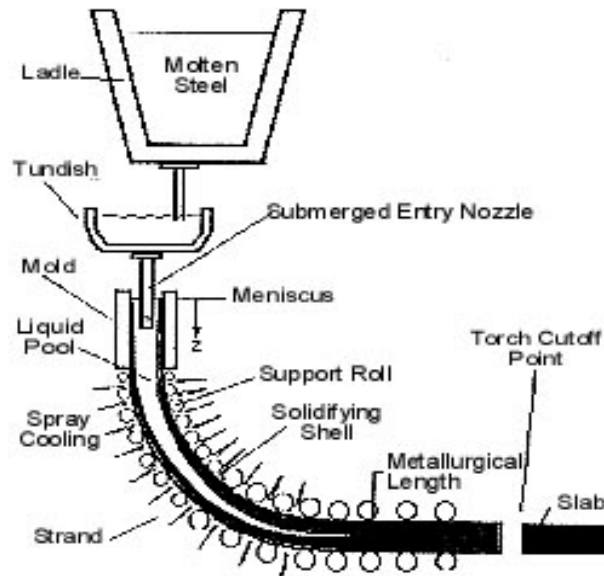
Tabel 2.2 Sistem Penomoran Paduan Aluminium Tuang (*Casting Alloys*)[1]

Elemen Paduan	Kelompok
Aluminium (min. 99% atau lebih)	1xx.x
Tembaga (Cu)	2xx.x
Silikon (Si) + Tembaga(Cu) dan atau Magnesium (Mg)	3xx.x
Silikon (Si)	4xx.x
Magnesium (Mg)	5xx.x
Seng (Zn)	7xx.x
Timah (Tin)	8xx.x
Elemen Lain	9xx.x

Pada dasarnya proses *direct chill casting* merupakan salah satu proses *semi continuous casting* yang memproduksi ingot aluminium. Dibawah ini merupakan bagian serta proses dari *continuous casting* dan *direct chill casting*.

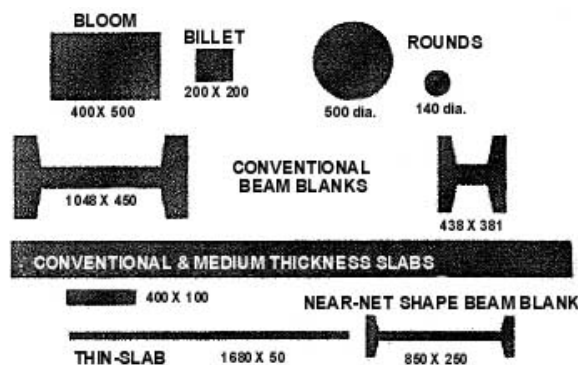
2.5 *Continuous Casting*

Pada prinsipnya, *continuous casting* memerlukan penuangan logam cair kedalam sebuah cetakan dari bahan tembaga dengan pendinginan air. Cetakan ini merupakan sebuah kotak/ silinder berlubang. Bentuk cetakan tergantung dari bentuk ingot yang akan diproduksi. Pada bagian sisi bawah cetakan awalnya ditutup dengan sisi atas dari *bottom block* dan logam dituangkan ke cetakan, lalu logam membentuk lapisan kulit sehingga dapat menahan aliran logam cair bagian dalam dari lapisan kulit. Setelah terbentuk lapisan kulit yang dapat menahan aliran logam bagian dalam, *bottom block* ditarik ke arah bawah dengan kecepatan tertentu. Kekuatan yang terbentuk sama (*uniform*) pada setiap sisi (oleh karena laju pendinginan) dan bebas dari keretakan pada permukaan adalah sifat dasar jika proses pengecoran berjalan dengan baik. Kecepatan aliran logam hingga cetakan dikontrol dengan memakai sebuah nosel (*submerged entry nozzle*) untuk memberikan kecepatan logam yang konstan.



Gambar 2.4 Proses *Continuous Casting*[4].

Pada saat yang tepat, *bottom block* ditarik kearah bawah jika logam mulai terbentuk lapisan yang mengeras. Proses penarikan dikontrol dengan pegangan *pinch rollers* pada *bottom block*, dan setelah *bottom block* turun menjauhi cetakan, *roller grip* mengeraskan logam. Setiap operator akan memberikan laju pengecoran yang berbeda pada mesin yang sama dan pada pengecoran yang sama juga, ini tergantung dari peralatan itu sendiri . Sebuah pelumasan cetakan biasanya dipakai untuk menghasilkan logam yang baik atau terpisah dari cetakan dan juga memperbaiki temperatur kontak antara logam dan cetakan.



Gambar 2.5 Bentuk-bentuk Hasil *Continuous Casting*[4]

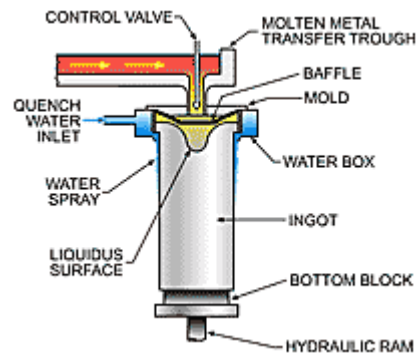
Ketika keluar dari cetakan, logam panas didinginkan lebih lanjut oleh semprotan air secara kontinu untuk mengatur pengerasan permukaan, hingga diperoleh temperatur yang cukup karena panas pada pusat dari logam akan dihilangkan untuk menjamin kekerasannya, ini merupakan proses pendinginan kedua.

Setelah logam mengeras, logam dipotong dengan panjang tertentu dengan cara *oxy-acetylene* atau dengan cara geser.

2.6 Direct Chill Casting

Suatu proses untuk peleburan logam dan pembekuan logam hingga menjadi produk setengah jadi yang berbentuk *billet*, *slab*, atau *beam blank*. Sekarang, *direct chill casting* dipakai untuk memproduksi ingot aluminium[3,6,7]. *Direct chill casting* telah dipakai untuk memproduksi aluminium sebanyak 20 juta ton setiap tahun di dunia. Untuk kapasitas suatu mesin *direct chill casting* antara 2 ton hingga 100 ton dalam sekali proses pengecoran, dengan panjang hasil pengecoran antar 3 meter hingga 12 meter.

Proses *direct chill casting* diilustrasikan pada gambar 2.6, logam cair dituangkan dari *ladle* pada temperatur $\pm 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ turun ke *tundish* (*molten metal transfer trough*) lalu turun ke cetakan dimana dibagian bawah dari cetakan ditutup oleh bagian atas dari *bottom block* yang berguna sebagai penahan logam cair tidak keluar dan kemudian *bottom block* diturunkan lalu didinginkan dengan cara disemprot dengan air. Kulit ditarik dari bawah pada cetakan pada kecepatan pengecoran yang sesuai dengan aliran logam didalam lapisan kulit., lalu proses operasi ideal dilakukan pada kondisi konstan. Dibawah cetakan air disemprotkan terus menerus kelapisan permukaan untuk mengurangi panas, dan akhirnya lapisan seluruhnya keras.



Gambar 2.6 Proses *Direct Chill Casting*[3]

Pengerasan dimulai dalam cetakan, dan dilanjutkan pada daerah setelah cetakan yaitu bagian penyemprotan air oleh nosel pada *water box* yang berbeda pendinginannya saat ingot turun terus menerus dengan kecepatan pengecoran.

Untuk memulai pengecoran, dibawah cetakan ditutup dengan sebuah *bottom block*. *Bottom block* ini mencegah cairan logam mengalir keluar dari cetakan dan mengatur kecepatan pengecoran sehingga proses pengerasan lapisan kulit dapat tercapai terlebih dahulu baru ingot diturunkan. Hasil lapisan terluar yaitu yang terdekat dengan *bottom block* telah terjadi pengerasan dengan ketebalan tertentu yang cukup kuat untuk menahan logam cair bagian dalamnya, setelah sebagian lapisan dalamnya terjadi pengerasan dibagian yang agak jauh dari *bottom block* maka *bottom block* ditarik dari cetakan ke arah bawah dengan kecepatan pengecoran tertentu, kecepatan ini sangat mempengaruhi hasil dari produk cor. Cairan logam aluminium terus menerus dituang ke cetakan untuk mengisi logam pada cetakan dan logam yang telah terbentuk lapisan kulit dengan ketebalan tertentu ditarik pada kecepatan pengecoran 42mm/min dengan dimensi diameter 320mm[5].

Karena proses yang kontinu dengan arah vertikal maka membutuhkan tempat/ posisi yang tinggi untuk melakukan proses ini. Proses *direct chill casting* merupakan proses pengecoran dengan produksi menengah hingga besar.

Tabel 2.3 Pengaruh Variasi Kecepatan Pengecoran (Kecepatan Turun *Bottom Block*), Air Yang Disuplai, dan Temperatur Penuangan Terhadap Cacat Pada Permukaan *Billet* Dengan Diameter 320mm[5]

Casting speed (mm/min)	Water supply (lt/min)	Casting temperatur (K)	Crack
42	100	953	No
42	150	953	No
42	150	973	No
42	150	993	No
42	200	953	No
50	100	953	Yes
50	150	953	No
50	150	973	No
50	150	993	No
50	200	953	Yes
55	100	953	Yes
55	150	953	Yes
55	150	973	Yes
55	150	993	Yes
55	200	953	Yes
70	100	953	Yes
70	150	953	Yes
70	150	973	Yes
70	150	993	Yes
70	200	953	Yes

2.6.1 *Ladle*

Ladle dipakai pada proses *direct chill casting* pada umumnya dipanasi terlebih dahulu sebelum dipakai dan dipastikan dalam keadaan kering. Semua reaksi yang terjadi di dalam *ladle* akibat dari *ladle* yang tidak kering akan sangat berbahaya sehingga wajib untuk menutup daerah sekitar dari operator. Jika membuat ingot aluminium, itu membutuhkan “selubung” untuk aliran cairan logam yang menghubungkan antara *ladle* menuju *tundish*. Ini normal dipasang untuk mengurangi aliran logam kontak dengan udara dan *oxide* dapat dibentuk. Alternatif sistem dipakai gas pelindung dapat dipakai yang berguna meminimalkan pembentukan dari *aluminium oxide (alumina)* di aluminium.

2.6.2 *Tundish*

Bentuk dari *tundish* (*molten metal transfer trough*) adalah persegi empat, dan untuk dialiri beberapa menit aliran cairan logam. Ukuran *tundish* didesain untuk memberikan aliran logam cair ke cetakan lalu mengukur ukuran nosel (*control valve*). Bahan tahan temperatur tinggi dipilih untuk nosel (*control valve*) ini adalah *zir conia* yang sering dipakai. Biasanya aliran nosel bebas dan tidak ada penghenti yang dipakai.

Tundish yang tahan temperatur tinggi, biasanya mempunyai kekuatan tahan panas yang standar sehingga perlu diganti setelah 6 hingga 10 kali proses pengecoran, atau mengganti suatu lapisan yang dapat diganti setelah tiap kali pakai.

2.6.3 Cetakan

Fungsi utama dari cetakan adalah membuat kulit padat untuk membentuk kekuatan dan dukungan inti cairan logam yang sedang masuk hingga selanjutnya yaitu semprotan air pada daerah pendinginan.

Cetakan pada dasarnya merupakan kotak yang dapat dibuka dan ditutup. Didalam permukaan cetakan sering dilapisi dengan chromium atau nikel agar memberikan permukaan cetakan yang keras, dan untuk menghindari permukaan dari produk cor retak.

Cetakan mempunyai kebutuhan untuk memperkecil gesekan untuk menghindari kulit sobek, dan logam cair lolos (tidak lengket dengan cetakan), yang mana dapat juga menimbulkan kerusakan peralatan dan mesin sehingga menambah waktu untuk membersihkan dan memperbaiki. Gesekan antara kulit dari ingot dengan cetakan akan dikurangi oleh pelumasan cetakan seperti oli atau bubuk fluk. Jika cairan biasanya memakai oli *rape seed*, lapisan film yang tipis mengalir dan melapisi didalam permukaan cetakan dari celah sempit atau lubang kecil pada setiap permukaan. Alternatif lain yang menggunakan bubuk fluk dilarutkan diatas dan dikontakkan dengan logam cair dan sebuah lapisan film cairan kaca diantara permukaan dalam cetakan dan *billet* yang sedang diproses. Pemakaian pelumasan akan memperbaiki dari kualitas *billet* dan memperbaiki

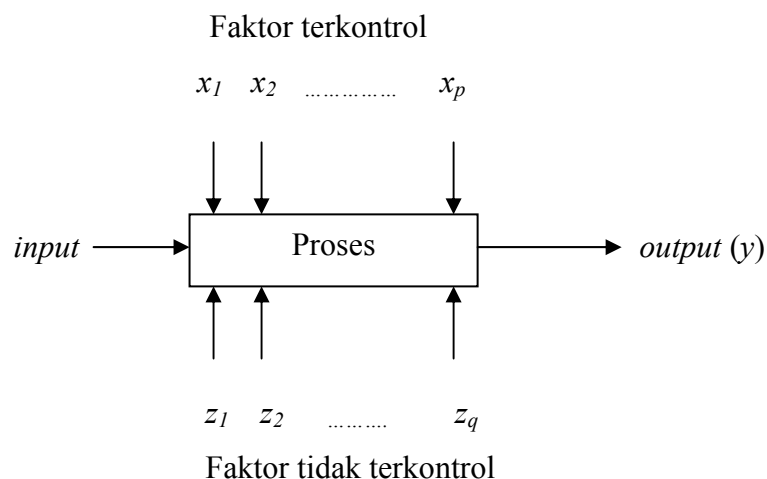
kualitas permukaan dengan hasil dirol. Bubuk fluk cetakan juga mengurangi kehilangan radiasi dan oksidasi logam.

2.6.4 *Bottom Block*

Bagian bawah dari cetakan ditutup dengan cara disumbat dengan *bottom block*. Tali asbestos atau material yang serupa, mungkin digunakan untuk melindungi dari kebocoran pada bagian tepi dan tentu bentuknya disesuaikan dengan bentuk dari bagian atas *bottom block* agar pertama kali penuangan logam hingga pendinginan masih disekitar itu.

2.7 Desain Eksperimen

Secara umum suatu eksperimen dapat diartikan sebagai sebuah atau sekumpulan tes yang dilakukan melalui percobaan-percobaan yang terencana, baik terhadap variabel input dari suatu proses atau sistem sehingga kita dapat menyelidiki dan mengetahui penyebab dari perubahan-perubahan output sebagai respon dari eksperimen tersebut. Pada umumnya eksperimen digunakan untuk mempelajari kinerja dari proses atau sistem yang biasanya divisualisasikan seperti kombinasi mesin, metode, orang dan bahan baku yang mempengaruhi proses perubahan input menjadi output. Pendekatan statistik digunakan untuk aplikasi pada proses eksperimen ini [8].



Gambar 2.7 Model Umum Suatu Proses Atau Sistem[8]

Gambar 2.7 menjelaskan model umum suatu proses atau sistem. Proses ini merupakan suatu rangkaian operasi dengan faktor input yang akan menghasilkan output (y) yang nilainya dipengaruhi oleh berbagai faktor terkontrol ($x_1, x_2, \dots, x_p$) maupun faktor tidak terkontrol ($z_1, z_2, \dots, z_q$). Tujuan dari eksperimen yang dilakukan meliputi:

- Menentukan variabel mana yang paling berpengaruh pada respon y .
- Menentukan pengatur suatu harga x yang berpengaruh, sehingga y hampir selalu berada disekitar nilai yang dikehendaki.

Disamping itu, eksperimen yang dilakukan juga memberikan informasi tambahan mengenai pengaturan suatu harga x yang mempengaruhi variabilitas dalam y dan meminimalkan variabel tak terkontrol (z).

Desain eksperimen adalah alat penting dalam dunia teknik untuk meningkatkan kinerja dari proses produksi. Selain itu, proses-proses produksi baru juga dikembangkan dengan aplikasi desain eksperimen. Penerapan teknik-teknik desain eksperimen pada awal pengembangan proses produksi memberikan beberapa manfaat:

- Memperbaiki hasil proses.
- Mengurangi variabilitas dan lebih mendekati nilai target yang diinginkan.
- Mengurangi waktu pengembangan (*development time*).
- Mengurangi biaya keseluruhan (*overall cost*).

Desain eksperimen juga digunakan sebagai metode dalam membuat suatu desain untuk suatu produk baru atau memperbaiki yang sudah ada. Beberapa aplikasi dari metode desain eksperimen dalam hal dunia teknik antara lain:

- Evaluasi dan perbandingan dari beberapa konfigurasi desain dasar.
- Evaluasi dari beberapa alternatif bahan baku.
- Pemilihan dan penentuan parameter-parameter desain sehingga proses dapat berjalan baik dalam berbagai kondisi yang beraneka ragam dan mutu produk tetap terjaga.

Ada dua aspek eksperimen, yaitu desain eksperimen dan analisa statistik data. Desain eksperimen statistik adalah proses perancangan eksperimen untuk mengumpulkan data yang tepat sehingga dapat dianalisa dengan menggunakan metode statistik, sehingga kesimpulan yang diperoleh bersifat objektif dan *valid*.

Aplikasi desain eksperimen dalam dunia teknik antara lain untuk peningkatan kinerja proses manufaktur, pengembangan proses baru serta peningkatan kinerja produk.

Tiga prinsip dasar dari desain eksperimen yaitu:

- Replikasi (n): diartikan sebagai pengulangan observasi atau eksperimen dasar yang mempunyai dua sifat penting yaitu memberikan estimasi dari *error* eksperimen dan efek yang lebih presisi.
- Randomisasi: merupakan pengacakan eksperimen dimana urutan percobaan atau *run* yang akan dilakukan ditentukan secara acak. Hal ini bertujuan untuk mencegah terjadinya kesalahan input secara kontinu. Randomisasi juga memberikan salah satu pemenuhan syarat yang dibutuhkan oleh metode-metode statistik yaitu tiap data haruslah bersifat independen.
- *Blocking*: adalah teknik untuk meningkatkan kepresisian dari eksperimen yang berbentuk pengalokasian unit-unit eksperimen kedalam blok, sehingga unit-unit eksperimen dalam suatu blok relatif bersifat homogen.

Langkah penuntun untuk melakukan desain eksperimen meliputi:

- a. Mengetahui dan menentukan masalah
- b. Pemilihan faktor, level dan range
- c. Pemilihan variabel respon
- d. Pemilihan desain eksperimen
- e. Pelaksanaan eksperimen
- f. Analisa statistik data
- g. Kesimpulan dan saran

Ada beberapa istilah yang dipakai dalam desain eksperimen, antara lain:

- Faktor yaitu variabel bebas yang mempengaruhi hasil eksperimen.
- Level faktor adalah tingkat nilai dari suatu faktor.
- Interaksi adalah perbedaan efek dari suatu faktor terhadap faktor yang lain, nilainya sama dan berpengaruh satu sama lain.
- Respon merupakan hasil pengamatan yang diperoleh dari penelitian dan pengukuran yang biasanya dilambangkan dengan y .
- Efek faktor adalah perubahan respon dari level yang berbeda dari suatu faktor. Ada dua jenis efek faktor yaitu efek faktor utama dan efek interaksi.

- *Run (N)* adalah jumlah kombinasi yang harus dipenuhi dalam suatu perancangan.
- Replikasi (*n*) menyatakan jumlah observasi yang dilakukan pada satu kombinasi perlakuan.

2.7.1 Analisa Variansi (Anova)

Analisa variansi (*anova* atau *analysis of variance*) merupakan analisa secara statistik yang dinyatakan dalam bentuk tabel untuk menyelidiki pengaruh dari faktor-faktor yang dicurigai mempunyai efek yang signifikan terhadap suatu respon tertentu. Hasil pertama yang didapatkan dari *anova* adalah mengetahui signifikansi pengaruh dari faktor-faktor dalam eksperimen. Selain itu *anova* juga digunakan untuk menganalisa data-data yang diperoleh. *Anova* bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari faktor-faktor yang diambil, apakah faktor berdiri sendiri atau berinteraksi dengan faktor lainnya.

Pengujian hipotesa secara statistik adalah suatu pernyataan mengenai faktor yang mengikuti suatu distribusi probabilitas tertentu. Faktor yang diuji dibandingkan dengan suatu nilai yang tertentu atau faktor yang sama pada level yang berbeda.

$$H_0 : \theta_1 = \theta_2$$

$$H_1 : \theta_1 \neq \theta_2$$

dimana: θ = faktor yang diuji

H_0 = hipotesa nol (hipotesis yang diinginkan)

H_1 = hipotesa alternatif

Pengujian hipotesa dapat juga menggunakan hipotesa alternatif satu sisi, yaitu:

$$H_0 : \theta_1 < \theta_2 \text{ atau } H_1 : \theta_1 > \theta_2$$

Dari pengujian hipotesa ini dilakukan uji statistik sehingga dapat ditarik kesimpulan untuk menolak atau gagal menolak H_0 . pada *anova*, untuk mengetahui apakah suatu faktor memberikan efek yang signifikan terhadap respon, dilakukan uji hipotesa dalam bentuk *F-test* dan menghitung persentase kontribusi.

Hasil dari uji hipotesa akan menyatakan untuk menolak atau gagal menolak H_0 pada nilai α tertentu. Seringkali pernyataan ini tidak cukup memuaskan, karena tidak dapat diketahui sejauh mana perbedaan nilai terjadi.

Untuk mengatasi masalah ini, pendekatan *p-value* digunakan. *p-value* merupakan nilai α yang terkecil dimana masih dihasilkan kesimpulan untuk menolak H_0 .

Sum of squares (SS), atau jumlah dari kuadrat adalah hasil perhitungan pertama dalam *anova*, dimana dikenal:

- $SS_T = \text{total sum of squares}$
- $SS_m = \text{sum of squares due to mean}$
- $SS_e = \text{sum of squares due to error}$
- $SS_t = \text{total corrected sum of squares}$
- $SS_{treatment} = \text{total sum of squares due to treatment}$

Hubungan matematis dari lima macam *Sum of squares* diatas adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} SS_T &= SS_m + SS_t \\ &= SS_m + SS_{treatment} + SS_e \end{aligned}$$

derajat kebebasan (*degree of freedom* atau ν) adalah angka yang menunjukkan jumlah perbandingan independen (suatu *level* dari suatu faktor terhadap *level* lainnya) yang dapat dilakukan. Seperti *sum of squares*, derajat kebebasan ada lima macam dengan hubungan matematis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \nu_T &= \nu_m + \nu_t \\ &= \nu_m + \nu_{treatment} + \nu_e \end{aligned}$$

Variansi atau ukuran dari penyebaran atau derajat kecenderungan penyebaran data numerik dari harga rata-ratanya, dalam *anova* dikenal dengan istilah *mean square* (nilai kuadrat rata-rata) diperoleh dari *sum of square* dibagi dengan derajat kebebasan. Berikut rumus matematisnya:

$$MS_x = \frac{SS_x}{\nu_x}$$

F-ratio adalah perbandingan antara *mean square* dari suatu faktor penyebab variansi ($MS_{treatment}$) dengan variansi dari *error* (MS_e). Sebagai analisa awal, makin besar *F-ratio* suatu faktor atau suatu interaksi (F_{ox}), maka makin signifikan pengaruh faktor atau interaksi tersebut terhadap respon (y).

$$F_o = \frac{MS_{treatment}}{MS_e}$$

dengan mengetahui nilai F_o maka langkah selanjutnya adalah melakukan F -test dengan membandingkan nilai F_o dengan F -ratio yang didapatkan dari tabel distribusi F. Uji ini untuk melihat signifikansi pengaruh faktor atau interaksi terhadap respon dalam nilai α yang telah ditentukan. Nilai α berkaitan erat dengan adanya tingkat kepercayaan (*confidence level* atau *confidence coefficient* atau CL), hubungan matematisnya:

$$CL = 1 - \alpha ; \text{dimana biasanya nilai } \alpha \text{ yang umum digunakan adalah } 5\%.$$

Pada desain eksperimen, dikenal adanya *alpha-error* dan *beta-error*, keduanya sebisa mungkin diminimalkan tapi tidak jarang terjadi juga. Kesalahan analisa dalam desain eksperimen dengan menerima efek faktor yang tidak signifikan sebagai efek faktor yang signifikan adalah *alpha-error*. Sedangkan analisa yang menerima efek faktor yang signifikan sebagai efek faktor yang tidak signifikan dianggap sebagai *beta-error*. Dari penjelasan diatas, terlihat kalau *alpha-error* bukanlah kesalahan fatal dibanding *beta-error*.

Jika nilai $F_o > F_{tabulated}$ maka efek suatu faktor akan signifikan terhadap respon. Untuk itu $F_{tabulated}$ dicari dengan pedoman tiga hal, yaitu:

- nilai α ,
- derajat kebebasan dari *numerator* (sumber variansi yang bersangkutan),
- derajat kebebasan dari *denominator* (MS_e).

Format dari $F_{tabulated}$ adalah F_{α, v_1, v_2} , dimana v_1 adalah derajat kebebasan *numerator* dan v_2 adalah derajat kebebasan dari *denominator*.

Keterbatasan dalam penggunaan F -test adalah:

- Asumsi konstannya nilai MS_e untuk semua sumber variansi.
- Adanya α yang memungkinkan terjadinya *alpha-error*.
- Pengambilan keputusan dalam teknik *pooling-up* dimana terjadi pengurangan faktor untuk menyederhanakan desain eksperimen.

Untuk mengantisipasi, keterbatasan dari F -test ini maka dengan menghitung persentase kontribusi(ρ). Persentase kontribusi memberikan data numerik mengenai kontribusi suatu faktor dalam memberikan efek terhadap respon.

Dalam perhitungan persentase kontribusi, dikenal *sum of squares of deviation from target* (SS_d). Target disini adalah hasil yang diinginkan pada respon (m). Jadi SS_d adalah penjumlahan dari kuadrat hasil observasi (y) dikurangi

dengan target. Selain itu dikenal juga *pure sum of square due to treatment* ($SS_{treatment}'$), yang didapat dari rumus:

$$SS_{treatment}' = SS_{treatment} - v_{treatment} \cdot MS_e$$

Persen kontribusi didapat dengan rumus:

$$\rho_{treatment} = \frac{SS_{treatment}'}{SS_t} \times 100\%$$

$$\rho_e = \frac{SS_e'}{SS_t} \times 100\%$$

Jika $\rho_e \leq 15\%$ maka diasumsikan tidak ada faktor penting terlewatkan, tetapi bila $\rho_e \geq 50\%$ maka diasumsikan ada beberapa faktor penting terlewatkan.

2.7.2 Desain Faktorial, Desain Faktorial Tiga Level (3^k) Dan Desain Faktorial Dengan Level Campuran

Pada eksperimen yang meneliti efek dari dua atau lebih faktor, desain faktorial adalah solusi paling efisien. Pada desain faktorial, semua kemungkinan kombinasi tiap *level* dari faktor-faktor dapat diselidiki secara lengkap. Tiap faktor yang berdiri sendiri memberikan efek yang disebut efek utama atau *main effect*, sedangkan efek yang ditimbulkan oleh beberapa faktor yang saling berkaitan disebut efek interaksi atau *interaction effect*.

Keunggulan penggunaan desain faktorial adalah:

- Lebih efisien dibanding metode *one-factor-at-a-time*.
- Mampu menunjukkan efek interaksi antar faktor.
- Bisa memberikan perkiraan efek dari suatu faktor pada kondisi *level* yang berbeda-beda dari suatu faktor lain.

Pada desain faktorial, setidaknya harus dilakukan paling tidak dua replikasi untuk menentukan SS_e jika semua kemungkinan interaksi masuk dalam model perhitungan.

Misalkan ada dua faktor A dan B yang digunakan dalam desain faktorial. Faktor A mempunyai jumlah level a dan faktor B mempunyai jumlah level b. Jumlah replikasi yang harus dilakukan adalah n. Jumlah observasi adalah:

$$N = a \cdot b \cdot n$$

Untuk perhitungan anova:

$$SS_t = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{a.b.n}$$

$$SS_A = \frac{1}{b.n} \sum_{i=1}^a y^2 i.. - \frac{y^2 ...}{a.b.n}$$

$$SS_B = \frac{1}{a.n} \sum_{j=1}^b y^2 .j. - \frac{y^2 ...}{a.b.n}$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{...}^2}{a.b.n} - SS_A - SS_B$$

$$SS_e = SS_T - SS_{\text{Subtotal (AB)}}$$

Tabel anova untuk perhitungan diatas bisa dilihat pada tabel 2.4

Tabel 2.4 Tabel Anova Untuk Model Desain Eksperimen Dua Faktor

Sumber Variasi	<i>SS</i>	<i>v</i>	<i>MS</i>	<i>Fo</i>
<i>A</i>	<i>SS_A</i>	<i>a - 1</i>	<i>MS_A</i>	$\frac{MS_A}{MS_e}$
<i>B</i>	<i>SS_B</i>	<i>b - 1</i>	<i>MS_B</i>	$\frac{MS_B}{MS_e}$
<i>AB</i>	<i>SS_{AB}</i>	<i>(a - 1)(b - 1)</i>	<i>MS_{AB}</i>	$\frac{MS_{AB}}{MS_e}$
<i>Error</i>	<i>SS_e</i>	<i>ab(n - 1)</i>	<i>Mse</i>	
<i>Total</i>	<i>SS_t</i>	<i>abn - 1</i>		

Untuk mengetahui apakah variabilitas dari respon benar-benar disebabkan oleh faktor dan interaksi yang dipilih, maka perlu dihitung koefisien determinasi (R^2):

$$R^2 = \frac{SS_{\text{model}}}{SS_t}$$

SS_{model} didapatkan dengan penjumlahan $SS_{\text{treatment}}$ dan $SS_{\text{interaction}}$. Jika harga koefisien determinasi ini semakin besar berarti pemilihan model pada desain eksperimen sudah sesuai dan persentase variabilitas respon yang disebabkan oleh faktor dan interaksi yang dipilih dapat ditunjukkan dengan harga koefisien determinasi tersebut.