

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian sebelumnya

Dwi dan Yusuf, (2012) meneliti bahwa dengan penambahan serat pada resin akrilik dapat menurunkan laju keausannya. Analisa tribology dilakukan untuk mengkaji aspek gesekan dan karakteristik keausan dan kontak antara permukaan. Dari hasil penelitian didapatkan laju keausan cenderung mengalami penurunan seiring dengan semakin banyaknya fraksi volume serat. Spesimen dengan fraksi volume serat sebesar 7% memiliki volume aus paling kecil yaitu sebesar $0,54 \text{ mm}^3$, serta spesimen dengan 0% fraksi serat memiliki volume aus terbesar yaitu $31,5 \text{ mm}^3$. Dari hasil foto mikro diketahui mekanisme keausan yang dominan adalah mekanisme abrasive dan adhesive.

Jefri (2010), meneliti tentang pengaruh tegangan kontak terhadap faktor keausan *die drawn GUR 1120 UHMWPE* yang dipasangkan dengan *cobalt chrome alloy* yang diinjeksikan ion berbasis nitrogen dengan menggunakan *pin on plat unidirectional movement Wetar Test*. Pin die drawn UHMPE diberi pembebanan hingga hasil dari tegangan kontak berkisar 5 MPa, 9 MPa, dan 12 MPa dengan kecepatan gesek yang konstan yaitu 116,5 mm/s. Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan, faktor-faktor keausan UHMWPE semakin menurun dengan tegangan kontak yang semakin tinggi. Keausan rata-rata UHMWPE terbesar adalah dengan tegangan kontak terendah (5MPa) dengan $2,67 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. Nilai faktor keausan mengalami perbedaan karena peningkatan tegangan kontak merubah mekanisme dari keausan pada permukaan kontak. Tegangan kontak yang rendah didominasi oleh keausan abrasif sedangkan dengan meningkatnya tegangan kontak didominasi dengan *burnishing wear mechanism* serta *surface deformation wear*.

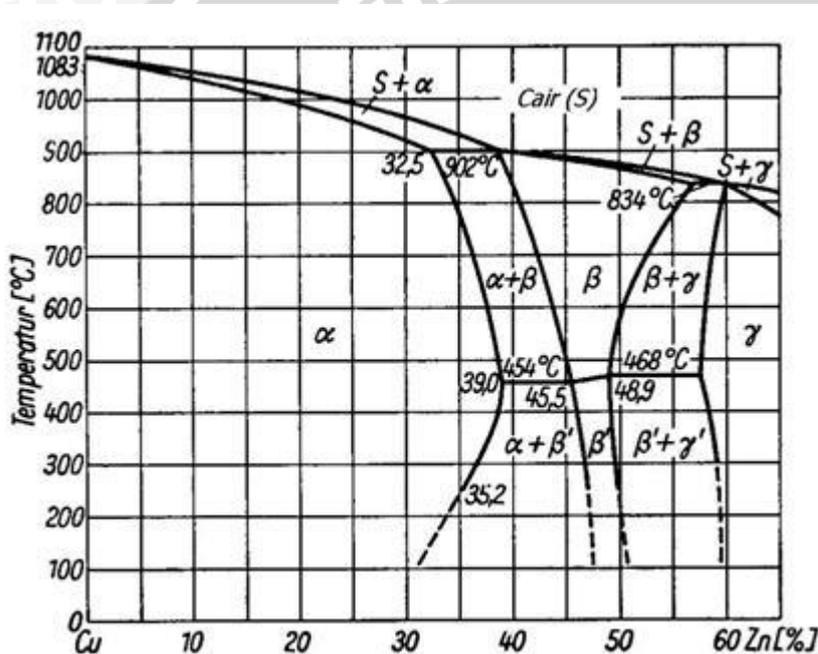
Havlicek dan Elbel, (2011) melakukan penelitian tentang geometri modulus cor dan pengaruhnya terhadap proses solidifikasi. Modulus cor ditentukan oleh perhitungan sederhana dari perbandingan volume coran setelah logam dituangkan kedalam cetakan terhadap luas selimut coran yang telah didinginkan. Hasil eksperimen telah membuktikan teori asli chvorinov dan penelitian terbaru yang telah dilakukan dengan menggunakan perhitungan numeric. Geometri modulus dan proses termal pengecoran mempengaruhi tingkat pemadatan yang lebih tinggi di bagian axial penampang pengecoran dan pemendekan waktu pembekuan.

2.2 Unsur paduan kuningan (*brass*)

Perunggu merupakan suatu paduan dengan senyawa utama tembaga (Cu) seng (Zn), perunggu mempunyai unsur-unsur lain yang memiliki sifat tahan terhadap korosi dan juga mempunyai daya hantar listrik yang cukup baik. Kadar perunggu yaitu tembaga (Cu) 78 – 79 %, seng (Zn) 22 – 40 %. Selain itu terdapat juga campuran tambahan lain seperti timbal (Pb), Zeng (Sn), nikel (Ni), besi (Fe), silicon (Si), mangan (Mn), aluminium (Al), krom (Cr), fosfor (P), belerang (S), dan arsenik (As). Salah satu penggunaan bahan perunggu biasanya bisa di gunakan untuk material seperti *bearing*.(Sukoco, 2011).

2.3 Sifat mekanik, kimia dan diagram CuZn

1. Diagram CuZn



Gambar 2.1 Diagram biner CuZn
ASM Handbook Vol 15: *Casting*. ASM International.1998

Tabel 2.1
Komposisi kimia dan sifat mekanik umum kuningan menurut ASM

Alloy type	UNS No.	Composition, %										Yield strength, 0.5%		Tensile strength		Elongation, %
		Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	Al	Mn	Si	Other	MPa	ksi	MPa	ksi	
Yellow brass	C85200	72	1	3	24	...	...	...	...	...	...	90	13	262	38	35
	C85400	67	1	3	29	...	...	...	...	...	83	12	234	34	35	
	C85700	61	1	1	37	...	...	...	...	...	124	18	345	50	40	
	C85800	62	1	1	36	...	...	...	...	...	207	30	379	55	15	
	C87900	65	...	...	34	...	...	...	...	1	...	241	35	483	70	25
White brass	C99700	58	...	2	22	5	...	1	12	...	...	172	25	379	55	25
	C99750	58	...	1	20	...	...	1	20	...	...	221	32	448	65	30

Tabel 2.2
Komposisi kimia dan sifat mekanik umum kuningan menurut ASM

Alloy Name	Mat No.	Composition	Delivery	Yield strength, 0.2% MPa	Tensile strength MPa	Elongation %	HBN	Specific Weight Kg/dm ³
G-CuZn15	2.0241.01	Cu: 83.0-87.5 As: 0.05-0.2 Zn: rest	SC	70	170	25	45	8.6
G-CuZn33Pb	2.0290.01	Cu: 63.0-67.0 Pb: 1.0-3.0 Zn: rest	SC	70	180	12	45	8.5
GD-CuZn37Pb	2.0340.05	Cu: 59.0-63.0 Al: 0.2-0.8	PDC	120	280	4	75	8.5
GK-CuZn37Pb	2.0340.02	Pb: 0.5-2.5 Zn: rest	GDC	90	280	20	70	
G-CuZn38Al	2.0591.02	Cu: 59.0-64.0 Al: 0.1-0.8 Zn: rest	GDC	130	380	20	75	8.5
G-CuZn40Fe	2.0590.01	Cu: 56.0-62.0	SC	130	300	15	75	8.6
GZ-CuZn40Fe	2.0590.03	Fe: 0.2-1.2 Zn: rest	CC	150	325	15	85	
GK-CuZn37Al1	2.0595.02	Cu: 60.0-64.0 Al: 0.3-1.8 Zn: rest	GDC	170	450	25	105	8.5
G-CuZn35Al1	2.0592.01	Cu: 56.0-65.0 Al: 0.5-2.0	SC	170	450	20	110	8.6
GZ-CuZn35Al1	2.0592.03	Fe: 0.5-2.0	CC	200	500	18	120	
GK-CuZn35Al1	2.0592.02	Mn: 0.3-3.0 Zn: rest	GDC	200	475	18	110	
G-CuZn34Al2	2.0596.01	Cu: 55.0-66.0 Al: 1.0-3.0	SC	200	600	15	140	8.6
GZ-CuZn34Al2	2.0596.03	Fe: 0.5-2.5	CC	260	620	14	150	
GK-CuZn34Al2	2.0596.02	Mn: 0.3-4.0 Zn: rest	GDC	260	600	10	140	
G-CuZn25Al5	2.0589.01	Cu: 60.0-67.0 Al: 3.0-7.0	SC	450	750	8	180	8.2
GZ-CuZn25Al5	2.0589.03	Fe: 1.5-4.5	CC	450	750	5	190	
GK-CuZn25Al5	2.0589.02	Mn: 2.5-5.0 Zn: rest	GDC	480	750	8	180	
G-CuZn15Si4	2.0492.01	Cu: 78.0-83.0	SC	230	400	10	100	8.6
GD-CuZn15Si4	2.0492.05	Si: 3.8-5.0	PDC	300	550	8	125	
GK-CuZn15Si4	2.0492.02	Zn: rest	GDC	300	500	10	120	

SC: Sand Casting
PDC: Pressure Die Casting
GDC: Gravity Die Casting
CC: Centrifugal Casting

2.4 Pengertian keausan

Definisi paling umum dari keausan yang telah dikenal sekitar 50 tahun lebih yaitu hilangnya bahan dari suatu permukaan atau perpindahan bahan dari permukaannya ke bagian yang lain atau Bergeraknya bahan pada suatu permukaan. Definisi lain tentang keausan yaitu sebagai hilangnya bagian dari permukaan yang saling berinteraksi yang terjadi sebagai hasil gerak relatif pada permukaan. Keausan yang terjadi pada suatu material disebabkan oleh adanya beberapa mekanisme yang berbeda dan terbentuk oleh beberapa parameter yang bervariasi meliputi bahan, lingkungan, kondisi operasi, dan geometri permukaan benda yang terjadi keausan.

$$\Delta m = W_0 - W_1 \dots\dots\dots(2.1)$$

$$\text{laju keausan} = \frac{\Delta m}{T} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

T = lamanya pengujian keausan (menit)

W_0 = berat awal spesimen sebelum diuji (g)

W_1 = berat sesudah spesimen diuji (g)

Δm = keausan/ selisih berat (g)

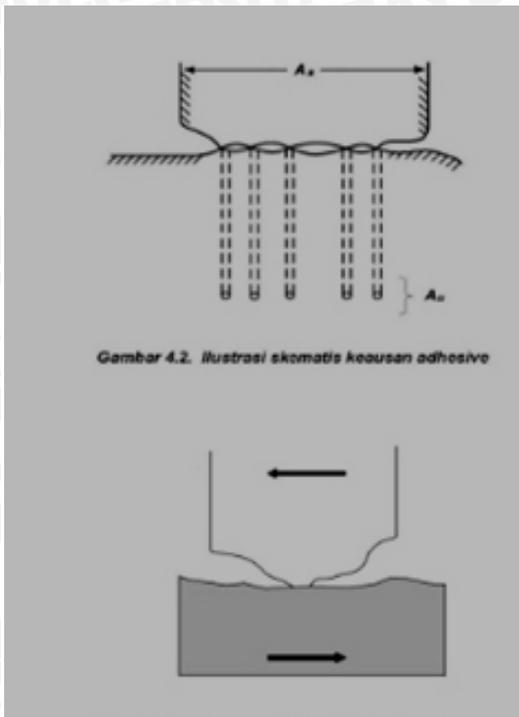
2.5 Jenis-jenis keausan dan penyebabnya

Mekanisme keausan dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku mekanis dari bahan dan keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku kimia dari bahan, sedangkan menurut Koji Kato, tipe keausan terdiri dari tiga macam, yaitu *mechanical, chemical and thermalwear*.

2.5.1 Keausan yang disebabkan perilaku mekanis (*mechanical*)

1. Keausan *adhesive (adhesive wear)*

Terjadi bila kontak permukaan dari dua material atau lebih mengakibatkan adanya perlekatan satu sama lainnya (*adhesive*) serta deformasi plastis dan pada akhirnya terjadi pelepasan atau pengoyakan salah satu material seperti di perlihatkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.2. Ilustrasi skematis keausan adhesive

Gambar 2.2 : Keausan *adhesive*

Sumber :Metal Handbook Ninth Edition, Volume 8, Mechanical Testing, ASM,1985

Faktor yang menyebabkan *adhesive wear* :

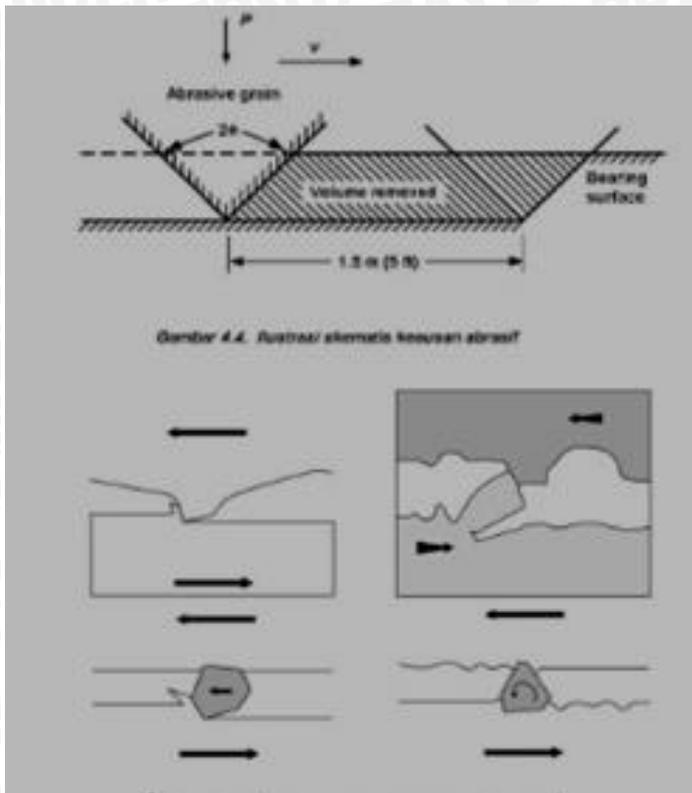
1. Kecenderungan dari material yang berbeda untuk membentuk larutan padat atau senyawa intermetalik.
2. Kebersihan permukaan.

2 Keausan *abrasive* (*abrasive wear*)

Terjadi bila suatu partikel keras dari material tertentu bergesekan pada permukaan material lain yang lebih lunak sehingga terjadi penetrasi atau pemotongan material yang lebih lunak. Tingkat keausan pada mekanisme ini ditentukan oleh derajat kebebasan (*degree of freedom*) partikel keras atau *asperity* tersebut.

Bentuk kerusakan permukaan akibat *abrasive wear*, antara lain :

1. *Scratching* (Goresan)
2. *Scoring* (Berpindah)
3. *Gouging* (Terkelupas)

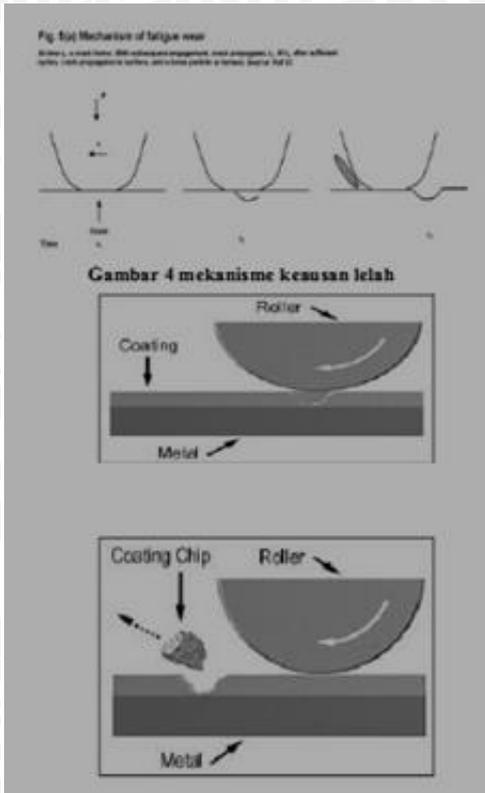


Gambar 2.3 : Keausan *abrasive*

Sumber :Metal Handbook Ninth Edition, Volume 8, Mechanical Testing, ASM,1985

3. Keausan lelah (*fatigue wear*)

Merupakan mekanisme yang relatif berbeda dibandingkan dengan dua mekanisme sebelumnya, yaitu dalam hal interaksi permukaan. Baik keausan *adhesive* maupun keausan abrasif melibatkan hanya satu interaksi, sementara pada keausan lelah dibutuhkan interaksi multi. Keausan ini terjadi akibat interaksi permukaan dimana permukaan yang mengalami beban berulang akan mengarah pada pembentukan retak - retak mikro. Retak - retak mikro tersebut pada akhirnya menyatu dan menghasilkan pengelupasan material. Tingkat keausan sangat bergantung pada tingkat pembebanan. Gambar dibawah ini memberikan skematis mekanisme keausan lelah.



Gambar 2.4 : Keausan lelah

Sumber : Metal Handbook Ninth Edition, Volume 8, Mechanical Testing, ASM,1985

4. Keausan oksidasi/korosif (*corrosive wea*)

Proses kerusakan dimulai dengan adanya perubahan kimiawi material di permukaan oleh faktor lingkungan. Kontak dengan lingkungan ini menghasilkan pembentukan lapisan pada permukaan dengan sifat yang berbeda dengan material induk. Sebagai konsekuensinya, material akan mengarah kepada perpatahan *interface* antara lapisan permukaan dan material induk dan akhirnya seluruh lapisan permukaan itu akan tercabut.



Gambar 2.5 : Keausan oksidasi/korosi

Sumber : Metal Handbook Ninth Edition, Volume 8, Mechanical Testing,ASM,1985

5. Keausan erosi (*erosion wear*)

Proses erosi disebabkan oleh gas dan cairan yang membawa partikel padatan yang membentur permukaan material. Jika sudut benturannya kecil, keausan yang dihasilkan analog dengan *abrasive*. Namun, jika sudut benturannya membentuk sudut gaya normal (90°), maka keausan yang terjadi akan mengakibatkan *brittle failure* pada permukaannya, skematis pengujiannya seperti terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.6 : Keausan erosi

Sumber : Metal Handbook Ninth Edition, Volume 8, Mechanical Testing, ASM, 1985

2.5.2 Keausan yang disebabkan perilaku panas (*thermal wear*)

1. *Melt wear*

Keausan yang terjadi karena panas yang muncul akibat gesekan benda sehingga permukaan aus meleleh.

2. *Diffusive wear*

Terjadi ketika ada pancaran (*diffusion*) elemen yang melintasi bidang kontak misalnya pada perkakas baja kecepatan tinggi. Dalam banyak situasi keausan, ada banyak mekanisme yang beroperasi secara erempak, akan tetapi biasanya akan ada satu mekanisme penentu tingkat keausan yang harus diteliti dalam hal ini berhubungan dengan masalah keausan. Hubungan antara koefisien gesek dan laju keausan belum ada penjelasan yang tepat, karena hubungan keduanya akan selalu berubah terhadap waktu. Saat ini yang paling banyak digunakan dan paling sederhana dalam memodelkan keausan adalah model keausan Archard, beberapa yang lain mencoba mengembangkan model keausan dengan memasukkan efek

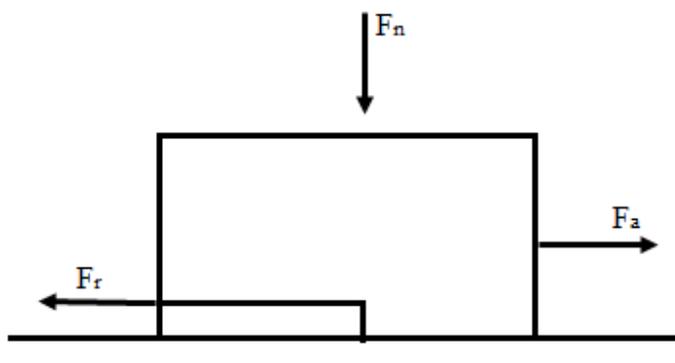
gesekan dalam menawarkan model yang lebih akurat yang di bandingkan dengan penelitian percobaan yang telah dibuat.

2.6 Teori *sliding*, *rolling* dan *rolling-sliding contact*

Keausan pada suatu benda dapat terjadi ketika benda tersebut mengalami kontak diantara dua permukaan, diantaranya dapat karena benda tersebut mengalami peristiwa *sliding*, *rolling* atau mengalami dua peristiwa yang bersamaan yaitu *rolling sliding*.

2.6.1 Teori *sliding contact*

Gesekan biasanya terjadi di antara dua permukaan benda yang bersentuhan, baik terhadap udara, air atau benda padat. Ketika sebuah benda bergerak di udara, permukaan benda tersebut akan bersentuhan dengan udara sehingga terjadi gesekan antara benda tersebut dengan udara. Demikian juga ketika bergerak di dalam air. Gaya gesekan juga selalu terjadi antara permukaan benda padat yang bersentuhan, sekalipun benda tersebut sangat licin. Permukaan benda yang sangat licin pun sebenarnya sangat kasar dalam skala mikroskopis (*asperity*). Jika permukaan suatu benda bergeseran dengan permukaan benda lain, masing-masing benda tersebut melakukan gaya gesekan antara satu dengan yang lain. Gaya gesekan pada benda yang bergerak selalu berlawanan arah dengan arah gerakan benda tersebut. Selain menghambat gerak benda, gesekan dapat menimbulkan aus dan kerusakan.

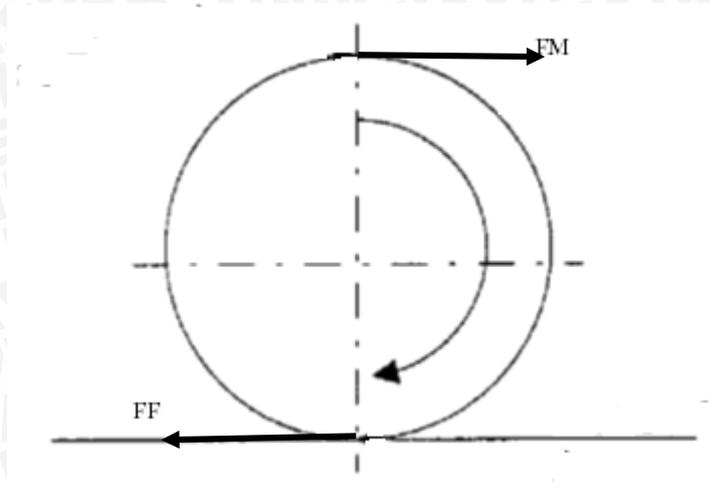


Gambar 2.7 Mekanisme *sliding contact*

2.6.2 Teori *rolling contact*

Rolling adalah perbedaan kecepatan sudut (*angular*) relatif antara dua benda terhadap suatu *axis* yang berada dalam suatu bidang tangensial. Yaitu fenomena terjadinya perpindahan (*displacement*) secara rotasi pada suatu titik, yang diakibatkan adanya

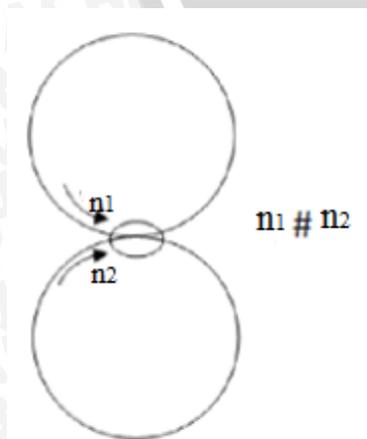
perbedaan w . Pada problem 2-D untuk dua buah silinder, kontak yang terjadi berjenis *line contact*. *Rolling contact* sesungguhnya hanya dapat terjadi jika terdapat gesekan, sehingga gaya tangensial yang dipindahkan akan selalu lebih kecil dari gaya normal. Jika gesekan dihilangkan, maka hanya terjadi perubahan sudut tanpa diikuti perpindahan.



Gambar 2.8 Mekanisme *rolling contact*

2.6.3 Teori *rolling-sliding contact*

Rolling contact dapat diartikan adanya kontak antara dua buah benda dimana benda mengalami rotasi dan adanya pembebanan untuk benda tersebut sehingga terjadinya kontak. ketika dua buah benda tersebut mengalami rotasi yang sama dapat dikatakan bahwa benda tersebut mengalami *rolling* sempurna. Namun dalam kenyataannya kondisi *rolling* sempurna sangat sulit ditemui.



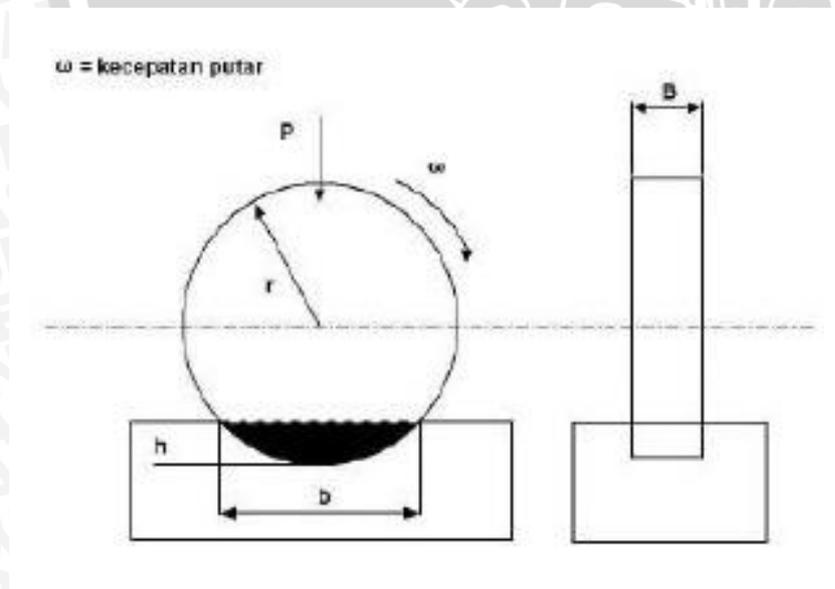
Gambar 2.9 Mekanisme *rolling sliding contact*

Ketika benda tersebut berputar, sedemikian sehingga titik kontak bergerak ke permukaan benda, kemudian ada dua kemungkinan dimana kecepatan V_1 dari titik kontak pada permukaan benda satu sama dengan kecepatan V_2 dari titik kontak diatas permukaan benda dua, atau tidak sama. Dalam kasus ini (kecepatan yang sama) orang menyebutnya *rolling*, kemudian kasus tentang dorongan dinamakan *sliding*, atau *Rolling* dengan *sliding*.

2.7 Model keausan (*wear*)

2.7.1 Metode pengujian ogoshi

Pengujian keausan dapat dilakukan dengan berbagai macam metode dan teknik, yang semuanya bertujuan untuk mensimulasikan kondisi keausan aktual. Salah satunya adalah metode ogoshi dimana benda uji memperoleh beban gesek dari cincin yang berputar (*revolving disc*). Pembebanan gesek ini akan menghasilkan kontak antar permukaan yang berulang ulang yang pada akhirnya akan mengambil sebagian material ada permukaan benda uji. Besarnya jejak permukaan dari material tergesek itulah yang dijadikan dasar penentuan tingkat keausan pada material. Semakin besar dan dalam jejak keausan maka semakin tinggi volume material yang terkelupas dari benda uji . Ilustrasi skematis dari kontak permukaan antara *evolving disc* dan benda uji diberikan oleh Gambar berikut ini.



Gambar 2.10 Mekanisme pengujian keausan dengan metode ogoshi

Rumus yang di gunakan pada pada metode ini yaitu:

$$V = \frac{W}{x} = \frac{B \cdot b^3}{12r \cdot x} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$W = \frac{B \cdot b^3}{12r} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana :

B = Tebal *revolving disc* (mm),

R = Jari-jari disc (mm),

b = Lebar celah material yang terabrasi (mm) maka dapat diturunkan besarnya volume material yang terabrasi (W).

2.8 Kekerasan

Adalah salah satu sifat mekanik (*Mechanical properties*) dari suatu material. Kekerasan suatu material harus diketahui khususnya untuk material yang penggunaannya akan mengalami pergesekan (*friction force*) dan deformasi plastis. Deformasi plastis sendiri suatu keadaan dari suatu material ketika material tersebut diberikan gaya maka struktur mikro dari material tersebut sudah tidak bisa kembali ke bentuk asal artinya material tersebut tidak dapat kembali ke bentuknya semula. Lebih ringkasnya kekerasan didefinisikan sebagai kemampuan suatu material untuk menahan beban indentasi atau penetrasi (penekanan).

Didalam aplikasi industri manufaktur, material yang dipakai produk dilakukan pengujian untuk mengetahui karakteristik suatu material dan melihat mutu untuk memastikan material memiliki spesifikasi kualitas tertentu. Kekerasan merupakan salah satu sifat mekanik material yang mempengaruhi kualitas produk. Kekerasan didefinisikan ketahanan material terhadap deformasi dan untuk properti logam adalah untuk ukuran ketahanan logam terhadap deformasi plastis (*Dieter, 325*).

Terdapat 3 jenis ukuran kekerasan secara umum, yang bergantung pada cara pengujian ketiga jenis tersebut adalah:

1. Kekerasan goresan (*Stracht Hardness*), adalah kekerasan yang diukur dari hasil goresan yang terdapat pada benda kerja. misalnya cara pengujian MOHS.
2. Kekerasan Lekukan (*Indentation Hardness*), adalah harga kekerasan yang diukur dari hasil lekukan yang terdapat pada benda kerja.

3. Kekerasan Pantulan (*Rebound*) atau kekerasan dinamik (*Dinamic Hardness*), adalah harga kekerasan yang diukur dari hasil pantulan yang dilakukan pada saat pengujian. misalnya cara penekanan : Brinell, Meyer, Vickers, Rockwell, dan lain-lain.

Penentuan kekerasan untuk keperluan industri biasanya digunakan beberapa metode yaitu pengukuran ketahanan penetrasi bola kecil, kerucut atau piramida. Pengujian kekerasan adalah salah satu dari sekian banyak pengujian yang dipakai. Karena dapat dilaksanakan pada benda uji yang kecil tanpa kesukaran mengenai spesifikasinya. Pengukuran kekerasan digolongkan dalam kelompok pengujian tak merusak. dan diterapkan untuk inspeksi sebagai suku cadang karena kekerasan dengan kekuatan tarik sedang ketahanan aus berbanding terbalik dengan kekerasan.

2.8.1 Pengaruh proses perlakuan panas terhadap kekerasan

Pada tiap perlakuan panas diatas mempunyai pengaruh yang berbeda – beda pada kekerasan misalnya *thermochemical treatments*, pengaruhnya terhadap kekerasan hanya pada kedalaman tertentu dari benda kerja, sesuai dengan yang diinginkan pada pengujian kekerasan yang dilakukan, perlakuan panas yang digunakan adalah *thermal treatment* yang meliputi : *annealing (full annealing, recrystalization annealing, stress relief annealing)*, *normalizing, hardening, tempering*,

Tiap-tiap perlakuan panas memberikan efek yang berbeda pada bahan yang dikenai, sedangkan pada thermal treatment prosesnya meliputi:

1. *Hardening*

Adalah proses pemanasan logam (baja) diatas temperatur kritis untuk beberapa waktu, lalu dicelupkan kedalam media pendingin sehingga tingkat kekerasan akan meningkat. *Hardening* juga dapat didefinisikan sebagai suatu proses yang bertujuan untuk mendapatkan struktur *martensite* yang keras dengan sifat kekerasan yang tinggi dan kekenyalan yang rendah.

2. *Tempering*

Adalah memanaskan kembali baja yang telah dikeraskan untuk menghilangkan tegangan dalam. Pada proses *tempering* baja yang telah di *heat treatments* atau dipanasi kembali pada suhu 150 °C - 650 °C.

1. *Anealing*

Adalah proses *heat treatment* dimana pemanasannya dilakukan sampai mencapai temperatur tertentu, dan ditahan pada temperatur tertentu yang diinginkan,

kemudian didinginkan perlahan. Tujuan *annealing* adalah untuk menghilangkan tegangan dalam. Pada peristiwa ini dilakukan pemanasan sampai diatas suhu kritis ($\pm 60^\circ\text{C}$), kemudian setelah suhu rata didinginkan diudara.

4. Normalizing

Adalah suatu proses *heat treatments* yang dilakukan untuk mendapatkan struktur butiran yang halus dan seragam. Pada proses ini dilakukan pemanasan diatas suhu kritis 721°C ($\pm 60^\circ\text{C}$), kemudian setelah merata didinginkan diudara.

Pada percobaan kita menggunakan proses *annealing* yang bertujuan :

- Melunakkan regangan sisa
- Menghaluskan ukuran butir
- Memperbaiki sifat kelistrikan
- Melunakkan dan memperbaiki keuletan

Secara khusus jenis *annealing* yang dipergunakan adalah *full annealing*. *Full annealing* digunakan untuk membuat baja yang lebih lunak, menghaluskan butir dan dalam beberapa hal dapat memperbaiki *machineability*. Baja dalam proses pengerjaan mengalami pemanasan sampai temperatur yang tinggi. Biasanya butir kristalnya akan terlalu besar, sehingga sifat mekaniknya kurang baik. Maka butiran kristal tersebut perlu dihaluskan dengan *full annealing*.

Pada baja *hypoutektoid* dipanaskan dengan range temperatur 30°C - 60°C diatas A1 pada dapur pemanas, ditahan pada temperatur itu dan didinginkan secara lambat (dengan media udara), sedangkan pada baja *hypotektoid* perbedaannya hanya pada pemanasan pada range 30°C - 60°C diatas garis A1.

2.8.2 Macam macam metode pengujian kekerasan

Terdapat tiga jenis umum dalam pengukuran kekerasan tergantung cara uji yang dilakukan, salah satunya adalah metode pengujian dengan cara indentasi.

1. Metode pengujian dengan indentasi (*indentation hardness*)

Pengujian kekerasan ini dilakukan dengan cara penekanan benda uji oleh indentor dengan gaya tekan yang telah ditentukan. Kekerasannya ditentukan dengan dalam atau luas area indentasi yang dihasilkan tergantung dari jenis pengujian dan indentornya.

a. *Brinell Hardness Test*

Pengujian kekerasan menggunakan metode brinell seperti pada gambar 2.11, dengan cara indentasi permukaan logam yang akan diuji dengan indenter bola baja berdiameter 10mm pada beban 500 - 3000kg. Beban diterapkan dengan waktu biasanya 30 detik, dan diameter lekukan hasil dari indentasi setelah beban dilepas, diukur dengan mikroskop daya rendah (Dieter, 326). Metode *brinell* cocok untuk material logam non ferrous (umumnya jenis tempa) serta biasanya dipakai material yang mempunyai permukaan yang rata dan luas permukaan yang besar. Nilai kekerasan dinyatakan dengan *Brinell hardness number* (BHN) atau HB, dengan membagi beban dengan luas permukaan lekukan menggunakan persamaan 2-1.

$$\text{BHN} = \frac{P}{(\pi/2) D^2(1-\cos \phi)}$$

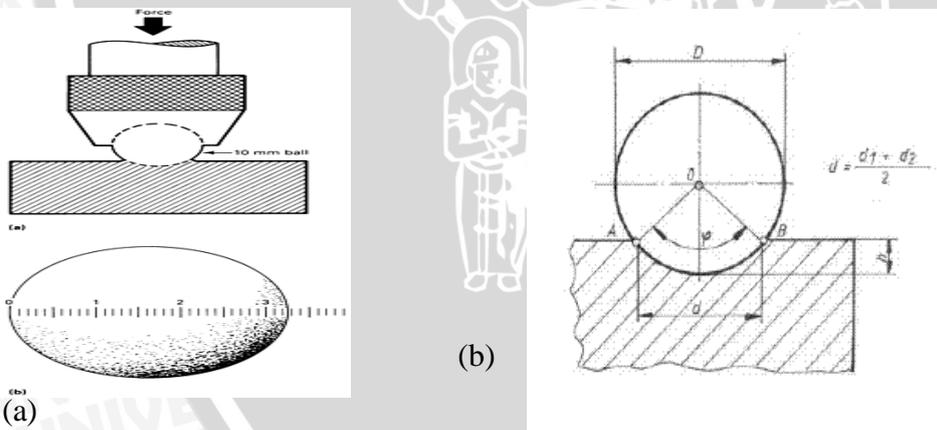
Dimana :

BHN : *Brinell Hardness Number*

P : Beban yang diterapkan , kg

D : Diameter bola, mm

d : Diameter indentasi, mm

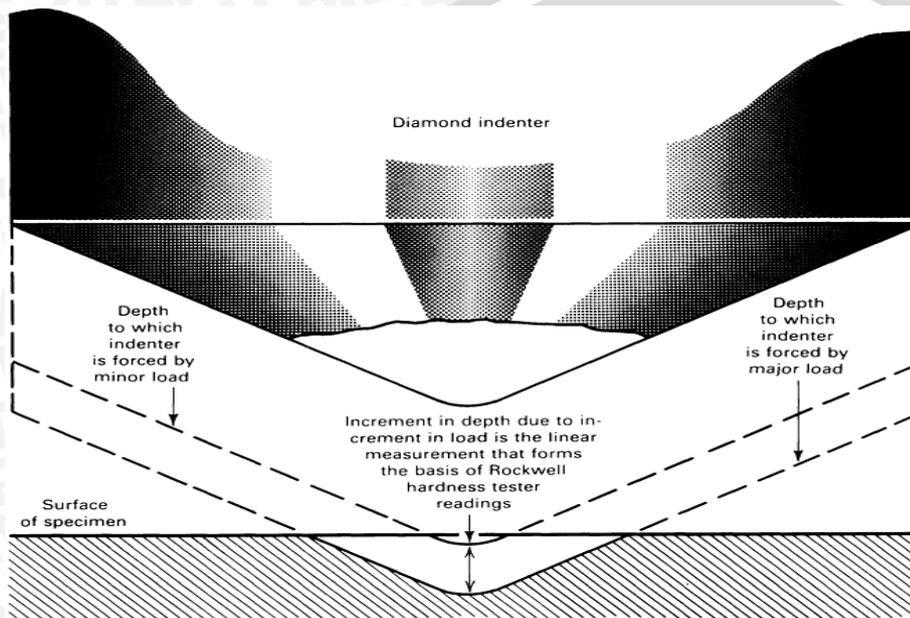


Gambar 2.11 (a) Skematik proses indentasi metode *brinell* (b) parameter pengujian *brinell*
Sumber : ASM Handbook Vol 8, 447

b. *Rockwell hardness test*

Pengujian kekerasan dengan *rockwell* dilakukan dengan beberapa standart yang sudah ditentukan, dan kekerasan yang didapatkan berdasarkan perbedaan kedalaman indenter dari dua aplikasi seperti tampak pada gambar 2.12,

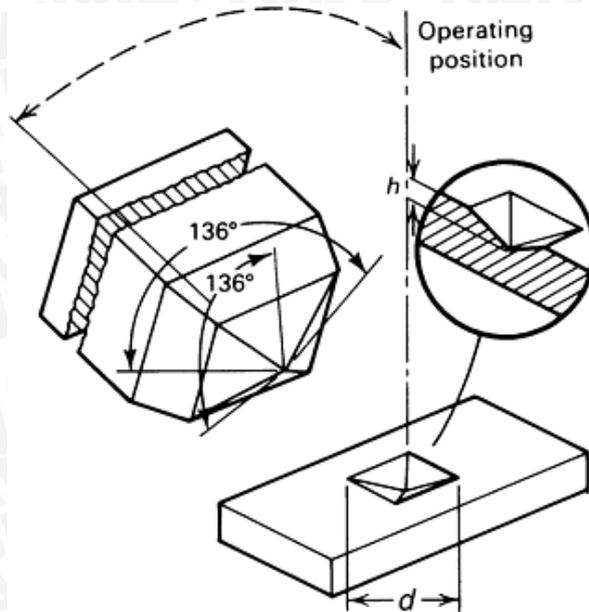
mengilustrasikan pengukuran kekerasan *rockwell*. Mengukur kekerasan menggunakan *rockwell* biasanya mencakup semua jenis material, baik itu material yang brittle ataupun getas, kebanyakan logam homogen atau paduan, termasuk baja dari segala bentuk produk dan kondisi perlakuan panas dan berbagai paduan nonferrous tempa dan cor. Nilai kekerasan *Rockwell* didapatkan bukan dari diameter lekukan hasil indentasi tetapi dari perbedaan kedalaman hasil lekukan.



Gambar 2.12 Ilustrasi pengujian kekerasan *rockwell*
Sumber : ASM Handbook Vol 8, 447

c. *Vickers hardness test*

Pengujian metode *Vickers* menggunakan indenter berbentuk piramida dengan sudut 136 derajat antar permukaan piramida intan yang saling berhadapan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13. Karena bentuk indenter nya berbentuk piramida, angka kekerasan *Vickers* dinyatakan dengan DPH (*diamond pyramid hardness number*) atau VHN (*vickers hardness number*). Untuk *vickers*, material yang akan diuji permukaannya harus rata dan halus serta cenderung untuk benda-benda yang kecil dan tipis. Prinsipnya hampir sama dengan metode *brinell*, kekerasannya dihitung dengan membagi gaya dengan luas permukaan lekukan hasil indentasi (sudah termasuk dengan indenter piramid dengan sudut 136 derajat).



Gambar 2.13 Indentor berbentuk piramida intan untuk uji vickers
Sumber : ASM Handbook Vol 8, 447

2.8.3 Faktor - faktor kekerasan

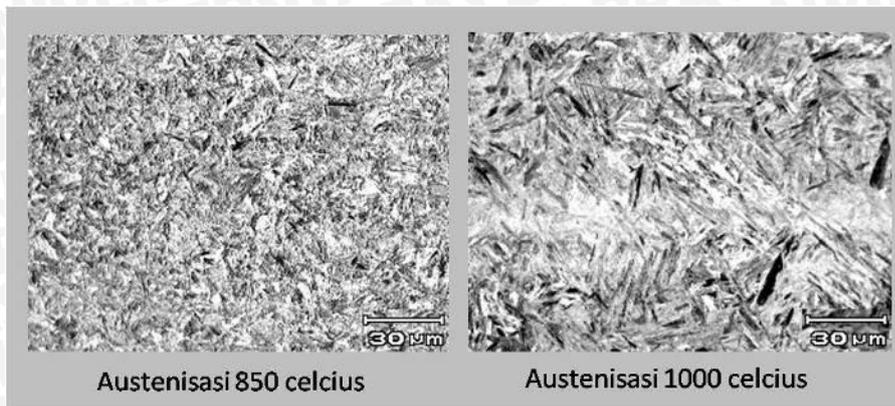
Dalam pengaplikasiannya, terdapat beberapa faktor yang memiliki dampak pada metode uji yang dipilih dan hasilnya didapatkan. Beberapa faktor umum yang mempengaruhi kekerasan antara lain :

1. Unsur paduan

Paduan yang terkandung pada sebuah material sangat berpengaruh terhadap kekerasan material, karena masing masing unsur paduan memiliki sifat mekanis yang berbeda beda.

2. Temperatur

Semakin tinggi temperatur pemanasan didalam tungku akan mempengaruhi struktur pada material menjadi lunak sehingga mempengaruhi kekerasannya.

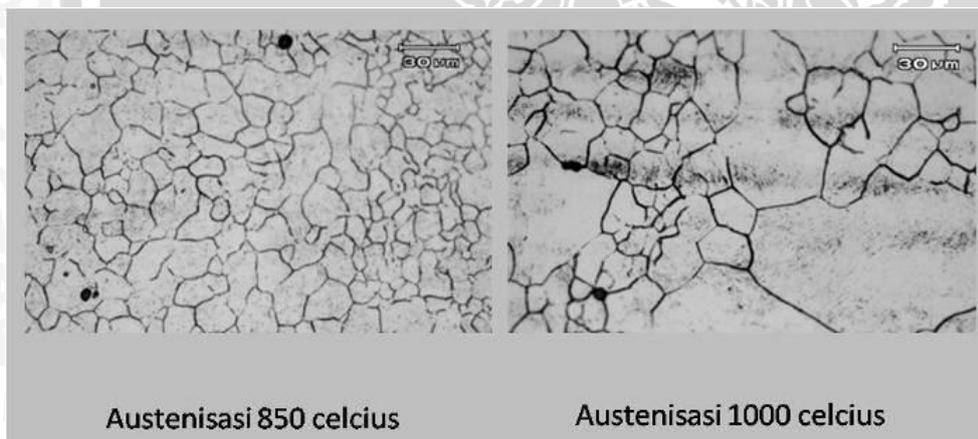


Gambar 2.14 Struktur martensite baja setelah *quenching* dengan temperatur *austenisasi* yang berbeda

Sumber : Thelning, K. E., 1984 “*Steel and its heat treatment*” Second edition, butterworth.

3. Bentuk dan dimensi butir

Ukuran butir yang besar dan kecil mempengaruhi kekerasan yang material. Material dengan ukuran butir yang besar memiliki kekerasannya yang lebih kecil dibandingkan dengan material dengan ukuran butir yang kecil.



Gambar 2.15 Perubahan butir fasa *Austenite* pada temperatur pemanasan 850⁰c dan 1000⁰c
Sumber : Thelning, K. E., 1984 “*Steel and its heat treatment*” Second edition, butterworth.

2.9 Pengecoran

Salah satu cara untuk membentuk material logam adalah dengan melakukan proses *casting* atau yang dikenal dengan istilah “pengecoran logam”. Yaitu membentuk suatu material logam dengan cara mencairkan logam dan menuangkan kerongga cetak yang berbentuk sesuai material logam yang diinginkan.

Sudjana (2008) pengecoran merupakan proses dasar yang penting dalam pengembangan industry yaitu memenangkan cairan logam kedalam rongga cetak dan tidak

digunakan tekanan dalam memasukan logam cair kedalam rongga cetakan (*cavity*) tersebut.

Temperatur logam sampai mencair pada proses pengecoran logam ada bermacam-macam yang tergantung dari jenis logam yang digunakan adapun jenis logam dan temperatur penuangannya dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.3
Temperature Jenis Logam

Jenis Logam	Temperatur Tuang ($^{\circ}\text{C}$)
Paduan ringan	650-750
Tembaga	1100-1250
Kuningan	950-1100
Besi cor	1250-1450
Baja cor	1500-1550

(Sumber: Tata Surdia, Chijiwa Kenji. 1986: 109)

Klasifikasi pengecoran didasarkan pada bahan cetakan secara umum proses pengecoran dikelompokkan menjadi dua yaitu :

1. *Expendable mold casting*

Expendable mold casting adalah cetakan yang hanya dipakai untuk sekali proses pengecoran. Bahan cetakan umumnya adalah pasir, gips, keramik, dan material sejenis yang dicampur bahan pengikat.

2. *Permanent mold casting*

Permanent Mold Casting adalah cetakan yang biasa dipakai berulang kali dan bahannya terbuat dari baja atau logam tahan panas. Dengan cetakan ini dihasilkan permukaan produk cor yang halus.

2.9.1 *Permanent mold casting*

Merupakan teknik pengecoran logam yang cetakkannya menggunakan baja atau besi tuang. Inti (*core*) dapat juga menggunakan logam coran permanen, namun inti tersebut harus bisa dilepaskan setelah logam cair membeku. Jenis cetakan ini bisa dipakai berulang kali (Heine, 1976:285).

Macam – macam *permanent mold casting* adalah:

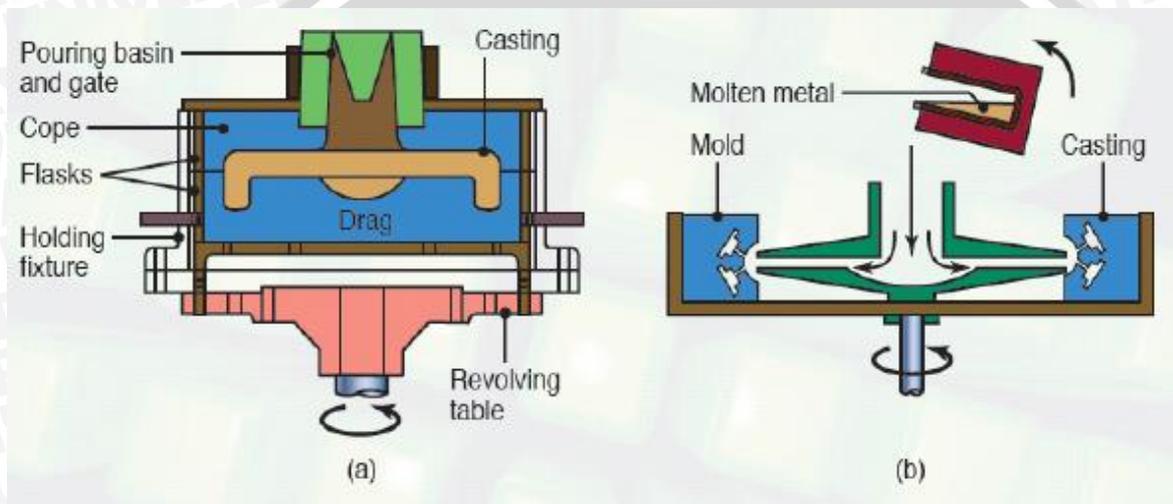
1. Pengecoran *sentrifugal*

Pengecoran *sentrifugal* dilakukan dengan menggunakan logam cair ke dalam cetakan yang berputar akibat pengaruh gaya *sentrifugal*. Logam cair akan terdistribusi ke

dinding rongga cetak dan kemudian membeku. Jenis - jenis pengecoran *sentrifugal* antara lain:

a. Pengecoran *semi sentrifugal*

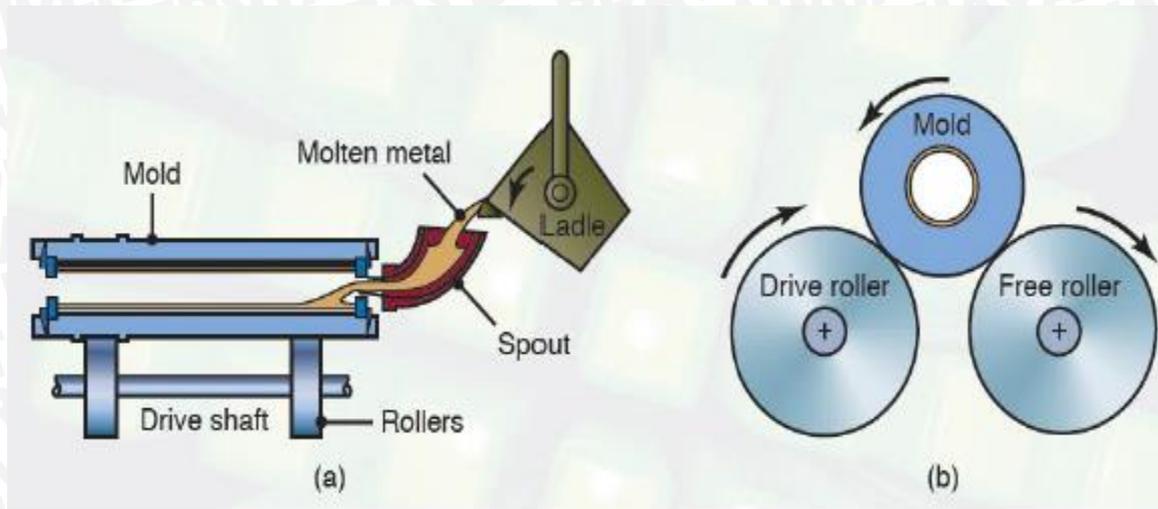
Pada metode ini gaya *sentrifugal* digunakan untuk menghasilkan coran yang pejal (bukan bentuk *tabular*). Cetakan dirancang dengan *riser* pada pusat untuk pengisian logam cair. Biasanya digunakan untuk pengecoran logam paduan. Biasanya untuk membuat roda gigi dan *pulley* atau membuat baling - baling seperti pada gambar dibawah.



Gambar 2.16 Proses pengecoran *semi sentrifugal*
Kalpakjian & Schmid, 2008

b. Pengecoran sentrifugal sejati

Logam cair dituangkan ke dalam cetakan horisontal yang sedang berputar melalui cawan tuang (pouring basin) yang terletak pada salah satu ujung cetakan. Pada beberapa mesin, cetakan baru diputar setelah logam cair dituangkan. Kecepatan putar yang sangat tinggi menghasilkan gaya sentrifugal sehingga logam akan terbentuk sesuai dengan bentuk dinding cetakan. Jadi, bentuk luar dari benda cor bisa bulat, oktagon, heksagonal, atau bentuk-bentuk yang lain, tetapi sebelah dalamnya akan berbentuk bulatan, karena adanya gaya radial yang simetri, dalam gambar berikut.



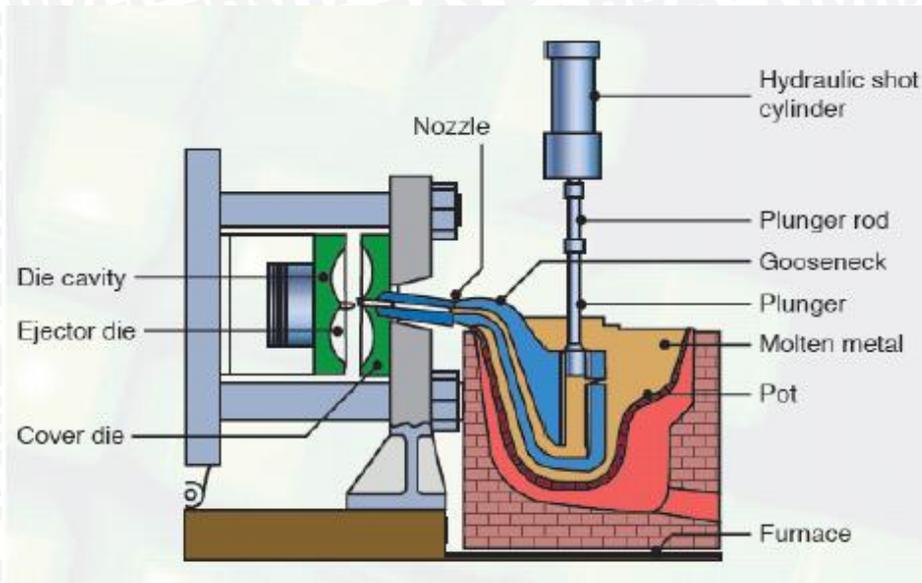
Gambar 2.17 Proses pengecoran sentrifugal sejati
Kalpakjian & Schmid, 2008

2. Pengecoran cetak tekan (*die casting*)

Pengecoran cetak tekan termasuk proses pengecoran cetakan permanen dengan cara menginjeksikan logam cair ke dalam rongga cetakan dengan cetakan tinggi (1-30MPa). Tekanan tetap dipertahankan selama proses pembekuan. Terdapat dua jenis cetak tekan, yaitu:

a. Mesin cetak tekan ruang panas (*hot chamber*)

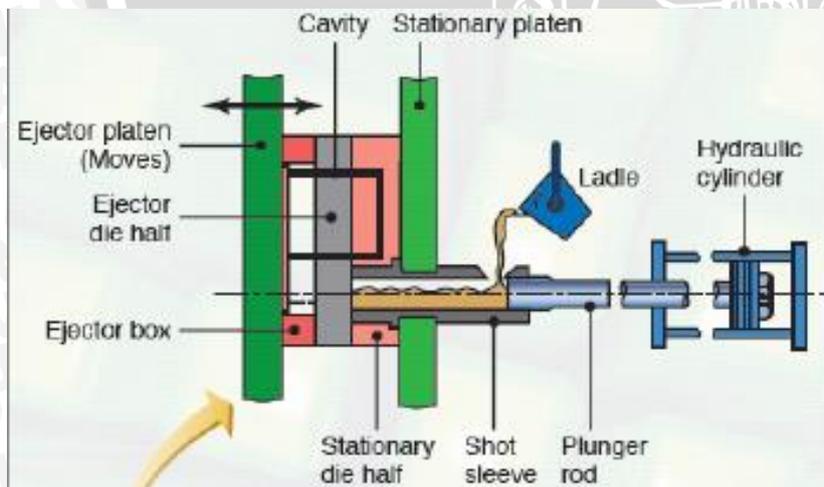
Pada mesin cetak ruang panas, tungku peleburan terdapat pada mesin dan silinder injeksi terendam dalam logam cair. Tekanan injeksi berkisar antara 7 - 35 MPa. Mesin ini digunakan untuk logam cair dengan titik lebur rendah seperti Sn, Pb, dan Zn. Dalam mesin pengecoran cetak panas, logam dilebur didalam *container* yang menjadi satu dengan mesin cetaknya, seperti yang ditunjukkan gambar berikut.



Gambar 2.18 Mesin cor cetak ruang panas
Sumber: Kalpakjian & Schmid, 2008

b. Mesin Cetak Ruang Dingin (*Cold Chamber*)

Pada mesin cetak ruang dingin, tungku peleburannya terpisah dengan silinder injeksi dan silinder injeksi diisi logam cair secara manual atau mekanis. Tekanan injeksinya berkisar antara 14 - 140 MPa digunakan untuk logam cor dengan titik lebur lebih tinggi dan biasanya digunakan untuk pengecoran logam *non ferrous*.



Gambar 2.19 Mesin cetak tekan ruang dingin
Sumber: Kalpakjian & Schmid, 2008

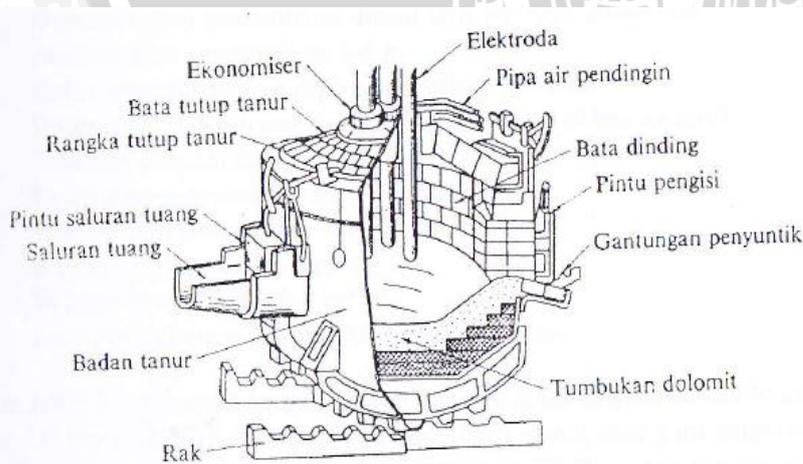
2.10 Peleburan

Peleburan atau pencairan (kadang kadang disebut fusi) 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. Peleburan logam merupakan aspek terpenting dalam operasi operasi pengecoran karena berpengaruh langsung pada kualitas produk cor. Pada proses peleburan mula mula muatan yang terdiri dari logam, unsur unsur paduan dan material lainnya serta unsur pembentuk terak dimasukkan ke dalam tungku. Karakteristik masing masing tungku peleburan adalah:

2.10.1 Dapur listrik

Tungku listrik merupakan jenis dapur dimana bahan baku dilebur dengan panas yang dihasilkan dari suatu busur listrik. Biasanya dapur listrik menggunakan 2 atau 3 elektroda dan biasanya digunakan untuk pengecoran baja. Material logam dapat mencair karena adanya elektroda yang dihubungkan dengan rangkaian listrik (*electrical circuit*) yang akan membentuk suatu busur api yang akan mencairkan logam. *Electrical-arm furnace* menggunakan 3 buah elektroda sesuai dengan jumlah fase dari aliran listrik yang digunakan adalah arus bolak – balik 3 fase. Pada *electric-arm furnace* ini bahan isian akan dipanaskan dan dicairkan oleh adanya radiasi dari busur listrik (*electric arc*) yang terjadi antara elektroda – elektroda yang digunakan. Pada instalasi ini digunakan *step down transformer* yang berguna untuk menurunkan tegangan (*voltage*) aliran listrik yang tinggi yang akan digunakan untuk memanaskan dan mencairkan bahan isian. Tanur listrik memiliki lapisan baja berbentuk silinder dengan landasan berbentuk lengkung atau datar yang ditopang rol penahan yang memungkinkan tanur untuk dimiringkan.



Gbr. 8.1 Tanur listrik Heroult.

Gambar 2.20 Dapur listrik heroult

Sumber : Surdia dan Kenji, 2013:164

2.10.1 Dapur induksi

Tungku induksi secara khusus dapat digunakan untuk keperluan *superheating* (memanaskan logam cair diatas temperatur logam cair normal). Cara kerja dari tungku ini menggunakan energi listrik sebagai sumber energi panasnya. Oleh karena itu, material yang dipakai untuk tungku ini harus tahan temperatur tinggi. Tungku juga harus memiliki ketebalan yang cukup untuk menahan beban logam cair didalamnya. Didalam proses tersebut mekanisme dibantu oleh medan magnet. Medan magnet ini melakukan pencampuran atau pengadukan untuk menghomogenkan komposisi pada logam cair. Selain itu transformator dapur ini menggunakan kumparan primer yang terdiri dari arus AC dari sumber tenaga dan kumparan sekunder. Kumparan sekunder yang diletakkan didalam medan magnet kumparan primer yang nantinya akan menghasilkan arus induksi. Arus induksi tersebut menjadi panas yang sanggup mencairkan logam bahan.



Gambar 2.21 Tungku induksi
Sumber : Tata Surdia (1986:146)

2.10.2 Reveberatory furnace

Tungku *Reveberatory* secara luas digunakan untuk meleburkan *ferrous* dan *non-ferrous alloy*. *Reveberatory* merupakan jenis tungku dimana logam dilebur oleh panas dari pembakaran bahan bakar disalah satu ujung perapian, meleawti bak yang isinya logam yang akan dicairkan menuju tumpukan di ujung lain. Didalam tungku *reveberatory* 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.

Reveberatory berkontruksi sederhana dan memiliki biaya yang relatif rendah sehingga membuat industry manufaktur masih mengandalkan untuk peleburan ingot secara massal dan juga untuk *recycling* aluminium. Tungku ini diproduksi dalam berbagai konfigurasi kontruksi yang tetap atau miring, persegi panjang atau silinder dengan kapasitas leleh 200-1300 kg/jam.

2.11 Proses penuangan logam cair

Proses penuangan merupakan bagian dimana rongga cetakan diisi dengan cairan yang telah dilebur. Proses ini memiliki syarat yang harus dipenuhi. Syarat-syarat ini ditinjau dari sifat dan jenis logam cair itu sendiri, proses pemindahan atau pengangkutan cairan logam menuju cetakan, maupun dari cetakan yang dibuat. Selain itu proses penuangan juga memiliki parameter yang harus dilakukan dengan tepat. Apabila ketentuan tersebut diabaikan, dapat mengakibatkan kegagalan dalam pengecoran, hasil pengecoran mengalami cacat (*defect*), kecelakaan kerja, serta merugikan dalam aspek ekonomi maupun energi.

Setelah proses penuangan, cairan logam mengalami mekanisme *solidification* (pemadatan). Dalam proses solidifikasi terdapat hal penting, yaitu mengenailamanya waktu supaya logam membeku, arah pemadatan dan proses penyusutan (*shrinkage*). Selama proses solidifikasi, struktur butir dan serat (*grain structure*) pada logam yang mulai padat terbentuk. Karakter dari *grain structure* tersebut dipengaruhi oleh komposisi logam itu sendiri. Oleh karena itu, agar memperoleh hasil coran yang maksimal, pekerja harus memahami dan menerapkan factor-faktor teknis penuangan logam.

Proses penuangan dilakukan setelah proses peleburan. Peleburan dilakukan menggunakan dapur *reveberatory*. Panas yang dihasilkan digunakan untuk meningkatkan suhu logam hingga mencapai titik lebur, sehingga mampu mengubah logam padat menjadi logam cair. Selain itu panas juga digunakan untuk meningkatkan temperatur cairan logam hingga mencapai suhu penuangan yang diharapkan. Cairan logam kemudian dituang melalui *pouring cup* lalu mengalir melewati *gating system* dan memenuhi seluruh rongga cetakan. Proses penuangan berhasil dengan catatan bahwa cairan logam harus mengalir ke dalam seluruh bagian rongga cetakan sebelum membeku. Faktor yang mempengaruhi penuangan antara lain, suhu penuangan, kecepatan penuangan, dan karakter aliran.

a. Suhu penuangan

Suhu penuangan merupakan suhu dimana cairan logam siap dituang kedalam cetakan. Hal ini sangat penting untuk mengetahui perbedaan antara suhu penuangan dan suhu pembekuan. Sehingga diketahui berapa besar panas yang berkurang ketika penuangan hingga mulai pembekuan. (Surdia dan Chijiwa, 1975)

b. Kecepatan penuangan

Kecepatan penuangan berarti kecepatan volume cairan logam ketika proses penuangan. Apabila kecepatan terlalu rendah, cairan logam dapat membeku sebelum mencapai seluruh rongga cetakan. Sebaliknya, jika kecepatan terlalu tinggi dapat terjadi masalah pada sifat aliran logam cair. Serta kecepatan penuangan yang semakin rendah akan mengurangi tingkat fluiditas. Hal ini karena penuangan yang lambat akan mempercepat pendinginan. Apabila penuangan terlalu cepat juga akan menimbulkan turbulensi. (Surdia dan Chijiwa, 1975)

c. Karakter aliran

Aliran fluida memiliki dua karakter yaitu turbulensi dan aliran laminar. Turbulensi merupakan sifat aliran fluida yang tak menentu pada besar dan arah kecepatan di seluruh fluida. Aliran turbulensi bersifat tidak tenang dan tidak teratur daripada aliran laminar yang lebih tenang dan lancer. Pada proses penuangan aliran turbulensi sebaiknya dihindari. Aliran turbulensi cenderung meningkatkan pembentukan logam oksida yang bisa terjebak pada saat pembekuan, sehingga mengurangi kualitas hasil pengecoran. Turbulensi juga dapat menyebabkan dinding cetakan terkikis. Kikisan tersebut berdampak pada aliran logam cair. erosi yang terjadi akan mempengaruhi geometri hasil pengecoran. (Surdia dan Chijiwa, 1975)

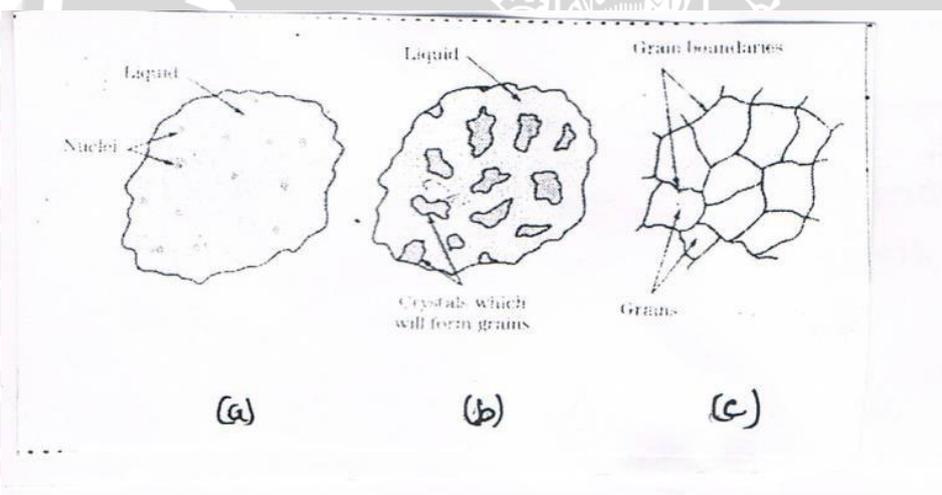
2.12 Solidifikasi

Solidifikasi merupakan proses perubahan bentuk cair logam kembali ke bentuk padat. Proses solidifikasi memiliki perbedaan antara jenis logam murni (*pure metal*) dan logam paduan (*alloy*). Logam murni memiliki suhu pembekuan yang konstan. Sedangkan suhu pembekuan logam paduan tidak konstan. Taksiran suhu pembekuan logam paduan ini tergantung pada system paduan dan komposisi paduan. Hal ini karena masing-masing unsur logam memiliki sifat yang berbeda. tahap yang dilalui dari suhu penuangan hingga mencapai suhu ruang yaitu, pendinginan cairan logam atau *liquid cooling*, pembekuan atau *freezing (liquid + solid)*, dan pendinginan logam padat atau *solid cooling*. Pembekuan dan

pendinginan logam disebabkan oleh aksi pendinginan dinding cetakan, sehingga cairan logam membentuk cangkang padat.

Laju pembekuan dan pendinginan logam ini berawal dari luar logam menuju tengah logam. Oleh karena itu, semakin tebal suatu coran maka semakin lama coran tersebut padat dan dingin. Selain itu kecepatan pendinginan suatu coran juga dipengaruhi oleh sifat termal dari logam coran tersebut untuk memindahkan panas ke cetakan. Berikut rumus besar kalor yang terjadi saat logam cair mengalami reaksi dengan cetakan logam secara konduksi, konveksi, dan radiasi.

Struktur kolom terjadi apabila terdapat gradient temperatur yang besar antara cetakan dan logam cair, hal ini dapat terjadi pada cetakan logam. Sedangkan pada cetakan pasir gradien yang terjadi kecil sehingga membentuk struktur kolom yang tidak jelas. Bagian tengah dari coran mempunyai gradien temperatur yang kecil sehingga merupakan susunan dari butir – butir kristal segi banyak dengan orientasi sembarang.



Gambar 2.22 Proses solidifikasi
Sumber : Peter Beeley, 2001:833

2.13 Modulus Cor (*casting modulus*)

Modulus Cor (*casting modulus*) merupakan sifat intrinsik pada proses pengecoran, yang berhubungan dengan waktu pembekuan cairan logam. Nilai *casting modulus* menunjukkan perbandingan antara volume terhadap luas permukaan coran. Idealnya, harga nilai *casting modulus* besar berarti waktu yang dibutuhkan cairan logam untuk membeku lebih lama. Cacat penyusutan (*shrinkage defect*) adalah satu dari sekian banyak cacat yang sering terjadi pada proses pengecoran. Penyebab cacat ini antara lain pembekuan yang tidak merata pada produk, dimana idealnya proses solidifikasi mengarah ke arah *riser*.

Dengan kata lain, *riser* adalah bagian terakhir dari sistem saluran yang membeku sesudah produk cor. Hal ini akan terjadi jika nilai modulus cor *riser* lebih besar dari pada modulus cor produk coran. Namun demikian, besarnya modulus cor *riser* memiliki batas tertentu untuk meminimalisir cacat penyusutan pada coran. Komposisi struktur paduan mempengaruhi kemampuan cairan logam untuk memindahkan energi panas. Besarnya energi panas yang dipindahkan berdampak pada waktu pembekuan cairan logam. Untuk menggambarkan perbandingan volume dan luas permukaan *casting*, atau dari berbagai bagian *casting*. Menurut aturan Chorinov, tiap bagian yang memiliki modulus lebih tinggi (perbandingan volume dengan luas permukaan kontak) akan membekukan terakhir, sedangkan bagian dengan nilai modulus yang lebih rendah akan membeku terlebih dahulu. Idealnya *casting* menjalani arah solidifikasi menuju riser (*feeder*), umumnya bagian *casting* yang memiliki nilai modulus tertinggi harus terpasang riser. Untuk mendapatkan sound casting yang baik maka modulus riser harus sama atau lebih besar dari *casting* untuk yang terpasang. modulus pengecoran sering digunakan untuk menganalisis terjadinya shrinkage yang disebabkan oleh kegagalan fungsi riser untuk mengkompensasi penyusutan pada produk cor. Secara geometri, modulus pengecoran merupakan perbandingan volume logam cair dengan luas penampang. Temperatur solidifikasi yang berbeda. Secara matematis modulus pengecoran (M_C) dirumuskan sebagai berikut:

$$M_C = \frac{V}{S}$$

Yang mana V =Volume [cm^3], S =Luas selimut pendinginan [cm^2]

Nilai kekerasan permukaan coran ini dipengaruhi oleh proses pendinginannya. Dimana spesimen dengan nilai *casting modulus* kecil akan membeku atau mengalami pendinginan yang lebih cepat dibandingkan dengan spesimen dengan *casting modulus* lebih besar. Pembekuan yang terjadi pada proses pengecoran adalah dimulai pada bagian logam cair yang bersentuhan dengan cetakan. Pada logam coran yang mempunyai *casting modulus* kecil akan mempunyai luas permukaan yang lebih besar. Sehingga panas dari logam cair akan cepat terserap ke dalam cetakan. Pada proses pendinginan yang cepat ini maka terjadi perbedaan laju pengintian pada masing masing spesimen. Dimana pada laju pendinginan yang cepat akan terjadi laju pengintian lebih besar dari laju pembentukan butir, sehingga terbentuk struktur yang lembut. Sedangkan pada laju pembekuan lambat terjadi laju pembentukan butir lebih besar dari laju pengintian, sehingga terbentuk struktur dengan butir yang lebih besar. Kehalusan butir ini yang mempengaruhi harga kekerasan yang semakin menurun dari nilai *casting modulus* kecil ke nilai *casting modulus* besar.

Harga kekerasan rata-rata aluminium semakin menurun dari spesimen dengan *casting modulus* 3 ke spesimen dengan *casting modulus* 6. Kekerasan rata – rata berkurang mulai dari spesimen dengan perbandingan casting modulus 3, 4, 5, serta 6. Kekerasannya adalah 109,71., 98,57., 95,46., dan 88,45 VHN. Penurunan yang terjadi relatif kecil dikarenakan pada spesimen ini nilai kekerasannya hanya dipengaruhi proses pendinginannya saja. Sehingga hanya tergantung pada formasi struktur mikro yang terbentuk selama proses pendinginan. (Dwiyanto 2010).

2.14 Hipotesis

Berdasarkan latar belakang dan tinjauan pustaka maka, semakin besar luas selimut coran *casting modulus* semakin rendah maka logam tersolidifikasi akan semakin cepat yang mengakibatkan terbentuknya bentuk butir yang semakin kecil yang mengakibatkan nilai kekerasan semakin meningkat sehingga nilai keausannya juga menurun.



