

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Sifat – Sifat Material**

Secara umum sifat – sifat material dibagi menjadi tiga :

##### **1. Sifat Mekanik**

Adalah sifat yang menunjukkan kelakuan material apabila material tersebut diberi beban mekanik (statik dan dinamik)

- Kekuatan tarik – tekan.
- Keuletan, ketangguhan.
- Keras getas.
- *Strain hardening*.

##### **2. Sifat Fisik – Sifat Kimia**

Adalah sifat yang berkaitan dengan karakteristik fisik atau kondisi dari material.

- Temperatur cair.
- Massa jenis.
- Warna.
- Ketahanan korosi.
- Konduktivitas panas dan listrik.

##### **3. Sifat Teknologi**

Adalah sifat yang berhubungan dengan kemudahan material untuk diproses lebih lanjut. Contoh :

- Mampu mesin : kemampuan suatu material untuk dipotong, dengan menggunakan alat potong (pahat, gergajai, kikir dan gerinda).
- Mampu cor : kemampuan suatu material untuk dicairkan dan di tuang ke dalam cetakan tanpa adanya cacat (patah, retak, porositas, segregasi).

- Mampu las : kemampuan suatu material untuk disambung dengan menggunakan panas tanpa adanya cacat (fasa keras, retak, distorsi).
- Mampu bentuk : kemampuan suatu material untuk di deformasi plastis dengan tidak terjadinya *necking* dan beban yang diperlukan rendah (*necking* adalah pengecilan penampang pada saat deformasi plastis berlangsung). (Yusril Irawan, 2018)

## 2.2 Baja

Baja adalah paduan antara Fe dan C (besi dan karbon), karbon maksimum dari baja adalah 2,1% karbon didalam baja membentuk (Fe<sub>3</sub>C atau sementit),

Klasifikasi baja Menurut komposisi kimianya :

### \*Baja Karbon.

Menurut kadar karbonnya, secara umum baja dikelompokkan menjadi 3 bagian yaitu : (Lamet, 2001).

#### a). Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*).

Baja karbon rendah atau juga disebut *mild steel* memiliki kandungan unsur karbon kurang dari 0,3%. Biasanya baja karbon rendah adalah hasil produk dari pengerjaan dingin dan proses anil. Baja karbon rendah dengan kadar karbon kurang dari 0,1% - 0,3% Mn menyebabkan *formability*-nya rendah jika dibandingkan dengan baja karbon lain. Baja ini dimanfaatkan untuk panel bodi pada mobil, pelat kaleng/tabung dan kabel. Produk baja yang dihasilkan dari proses pengerolan berpenampang pelat dengan kandungan karbon mencapai 0,3% dan kandungan mangan mencapai 1,5% banyak digunakan untuk *stamping*, *forging*, *seamless tubes* dan *boiler plate*.

**b). Baja Karbon Sedang (*Medium Carbon Steel*).**

Baja karbon sedang pada dasarnya adalah sama dengan baja karbon rendah, hanya persentase kandungan karbon dan mangannya lebih besar yaitu kandungan karbon antara 0,30 - 0,60% dan kandungan mangan antara 0,60 – 1,65%. Peningkatan unsur karbon sekitar 0,5% disertai dengan peningkatan unsur mangan sehingga memungkinkan baja karbon ini bisa digunakan untuk proses *heat-treatment* seperti proses *quenching* dan *tempering*. Baja ini biasa digunakan sebagai material pada komponen mesin seperti *shaft*, *axle*, roda gigi, *crackshaft*, kopling dan sebagainya. Baja karbon sedang dengan kandungan karbon 0,4 - 0,60% juga sering digunakan sebagai material untuk rel kereta api, roda kereta api dan poros rel kereta.

**c). Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steel*).**

Baja karbon tinggi memiliki kandungan karbon antara 0,60 - 1,00% dan kandungan mangan 0,30-0,90%. Baja karbon tinggi banyak digunakan sebagai material pada pembuatan pegas dan kawat dengan kekuatan tinggi.

**\*Baja paduan (*Alloy steel*).**

Baja paduan adalah baja karbon yang diberi tambahan unsur lain bisa satu atau lebih unsur-unsur tambahan untuk menghasilkan sifat-sifat yang dikehendaki (tidak dimiliki oleh baja karbon). Unsur tambahan yang umumnya digunakan adalah nikel, mangan dan chrom. Berdasarkan kadar paduannya, baja paduan dibagi menjadi tiga macam yaitu :

**a). Baja paduan rendah (*low alloy steel*).**

Baja paduan rendah adalah baja paduan yang mempunyai persentase unsur paduan rendah. Baja jenis ini biasanya memiliki paduan kurang dari 10%. Material baja ini sering digunakan sebagai material pada mesin perkakas seperti pahat kayu, poros, dan gergaji.

*Low alloy steel* dengan persentase karbon 0,4-0,55% (yaitu aisi 4140, 4340, 4150, 1552 dan 5150) dan *plain carbon steel* dengan persentase karbon 0,4-0,55% (yaitu, aisi 1045, 1046, dan seterusnya sampai dengan aisi 1050).

beberapa jenis baja ini banyak digunakan untuk bahan pembuatan roda gigi dan dilanjutkan dengan proses pengerasan seperti *induction surface hardening* (rudnev et al., 2003). selain material diatas juga terdapat material lain yang digunakan untuk bahan membuat roda gigi yaitu baja aisi 1045. baja aisi 1045 sangat banyak digunakan dalam bidang industri otomotif seperti untuk pembuatan roda gigi lurus (*spur gear*) (davis, 2005).

**b). Baja paduan menengah (*medium alloy steel*).**

Baja paduan menengah merupakan baja dengan paduan elemen 2,5 %- 10 %. Adapun unsur-unsur yang terdapat pada baja tersebut misalnya seperti unsure Cr, Mn, Ni, S, Si, P dan lain-lain.

**c). Baja paduan tinggi (*high alloy steel*).**

Baja paduan tinggi merupakan baja paduan dengan kadar unsur paduan lebih dari 10% berat. Adapun unsur-unsur yang terdapat pada baja tersebut misalnya unsur Cr, Mn, Ni, S, Si, P.

### 2.3 Besi Cor

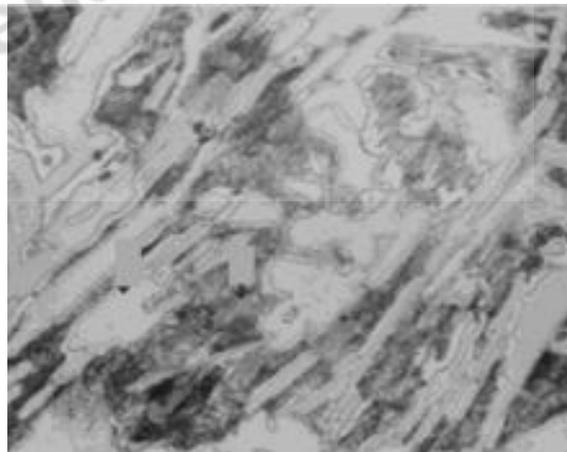
Besi cor merupakan paduan antara unsur besi yang mengandung *carbon* (C), *silica* (Si), mangan (Mg), phosphor (P), dan sulfur (S). Pada besi cor karbon biasanya antara 2% sampai 6,67%, sedang pada baja kandungan karbon hanya mencapai 2%. Semakin tinggi kadar karbon yang ada pada besi cor akan mengakibatkan besi cor rapuh/getas. Selain dari itu karbon besi cor juga mengandung silicon (Si) (1-3%), mangan (0,25-15%), dan phosphor (P) (0,05-15%), selain itu juga terdapat unsur-unsur lain yang ditambahkan untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu. Selain unsur-unsur yang ditambahkan dalam besi cor, juga terdapat faktor-faktor penting lainnya yang dapat mempengaruhi sifat-sifat besi cor tersebut antara lain proses pembekuan, laju pendinginan dan perlakuan panas yang dilakukan. Besi cor mempunyai keuntungan yaitu mampu tuang (*castability*) yang baik, kemudahan proses produksi dan rendahnya temperatur ruang, selain itu besi cor juga mempunyai sifat yang sulit dilakukan *drawing* atau diubah bentuknya pada temperatur kamar, akan tetapi besi cor memiliki titik lebur

yang relatif rendah yakni  $1150^{\circ}\text{C} - 1200^{\circ}\text{C}$  dan dapat dituang kedalam bentuk-bentuk yang sulit. Hal ini merupakan keuntungan dari besi cor karena untuk mendapatkan bentuk benda yang diinginkan hanya diperlukan sedikit proses pemanasan. Dan besi cor mempunyai kekerasan, ketahanan aus dan ketahanan terhadap korosi yang cukup baik.

Besi cor dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasarkan karakteristik struktur mikro yaitu :

### 1. Besi Cor Putih

Besi cor putih mempunyai bidang patahan yang putih, karbon disini terikat sebagai karbida yang bersifat keras, sehingga besi cor putih yang mengandung karbida sulit dilakukan permesinan. Besi cor putih dibuat dengan menuang besi cor kedalam cetakan logam atau cetakan pasir dengan pengaturan komposisi. Untuk mengolahnya dapat menggunakan dapur kopula atau tanur udara. Prosesnya dikenal dengan nama duplek. Dengan cara ini logam dapat dikendalikan dengan baik.



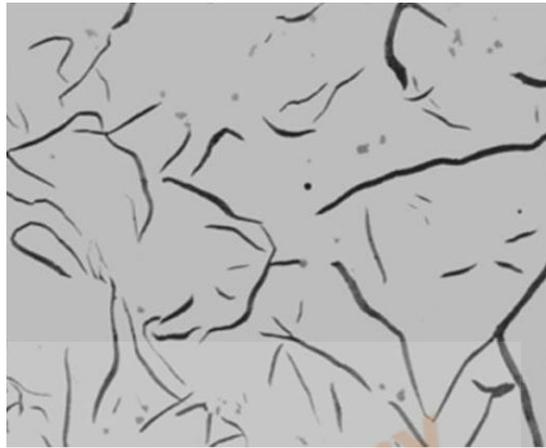
Gambar 2.1 Struktur Mikro dari Besi Cor Putih

(Widodo R, 2010)

### 2. Besi Cor Kelabu

Besi cor kelabu memiliki kadar silikon 2% dengan membentuk grafit dengan mudah sehingga  $\text{Fe}_3\text{C}$  tidak terbentuk. Besi cor kelabu pun memiliki kandungan karbon antara 2.5% - 4,0%, dan

kandungan mangan antara 0,2% - 1,0%. Serpihan grafit terbentuk dalam logam sewaktu membeku. Besi cor kelabu sangat rendah keuletannya sehingga apabila ketika diuji tarik maka akan terbentuk bidang perpatahan.

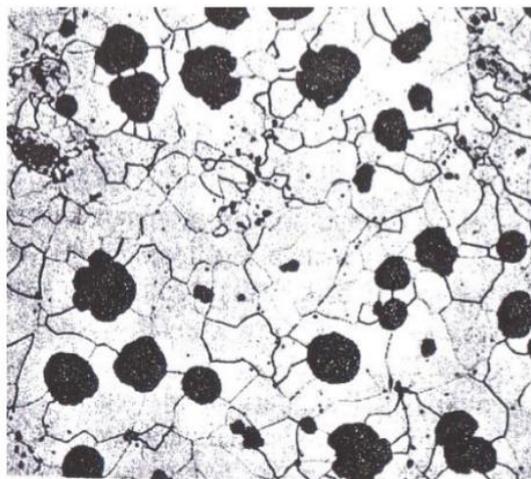


Gambar 2.2 Struktur Mikro dari Besi Cor Kelabu

(Sumber : Widodo R, 2010)

### 3. Besi Cor Nodular

Besi cor nodular memiliki keunggulan dibandingkan dengan besi cor lain. Besi cor nodular bersifat keras namun getas, tahan terhadap gesekan dan mampu tempa yang baik. Besi cor nodular sendiri memiliki keuletan yang tinggi.



Gambar 2.3 Besi Cor Nodular

(Sumber : Widodo R, 2010)

#### 4. Besi Cor Malleable

Besi tuang mampu tempa (*malleable cast iron*) merupakan besi tuang putih yang diberi perlakuan panas sampai kurang lebih 900 °C. Perlakuan panas yang diterapkan pada besi tuang putih umumnya adalah anil yang bertujuan untuk memisahkan karbida besi Fe<sub>3</sub>C menjadi besi dan grafit. Secara umum, besi tuang ini memiliki sifat yang sama seperti baja ringan. Besi tuang jenis ini memiliki mampu tempa yang sangat baik, serta ketahanan terhadap beban kejut dan mampu mesin yang baik sehingga banyak digunakan pada industri kereta api, otomotif, sambungan pipa dan industri pertanian.



Gambar 2.4 Besi Cor *Malleable*

(Sumber : Widodo R, 2010)

#### 2.4 Pengaruh Kandungan Kimia Besi Cor

##### - Pengaruh Tembaga (Cu)

Tembaga adalah logam yang berwarna kemerahan dengan berat jenis 8,65 gr/cm<sup>3</sup> yang mempunyai titik lebur 1070°C – 1193°C dan memiliki kekuatan tarik 200–400 N/mm<sup>2</sup>. Tembaga sering digunakan dalam industri karenan memiliki sifat–sifat yang menguntungkan antara lain adalah mempunyai sifat penghantar panas yang baik, memiliki keuletan yang tinggi (mudah dibentuk),

serta memiliki ketahanan korosi yang baik. Penambahan tembaga sebagai unsur paduan besi cor biasanya berkisar antara 0,3% - 1,5%. Tembaga juga berfungsi sebagai penstabil grafit pada besi cor.

- **Pengaruh Karbon (C)**

Karbon yang diserap yang berasal dari proses peleburan. Didalam besi cor karbon bersenyawa dengan besi membentuk karbida besi atau dalam keadaan bebas sebagai grafit. Grafitisasi adalah proses dimana karbon yang terikat dalam besi yang disebut sementit berubah menjadi karbon bebas. Grafit akan mudah terjadi apabila kadar karbon dalam besi cor lebih dari 2%.

Pembentukan grafit juga tergantung pada laju pendinginan dan kadar silikon. Jumlah karbon di dalam besi cor sekitar 2–3,7%. Untuk meningkatkan nilai karbon pada besi cor dapat dilakukan dengan cara *pack carburizing* yaitu pemanasan besi cor pada suhu tertentu dengan karbon sebagai zat penambahnya.

- **Pengaruh Silikon (Si)**

Silikon memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap perubahan sifat mekanik. Karbon dan silikon mempunyai fungsi yang mirip, keduanya mendorong pembentukan grafit sehingga kandungan kedua unsur ditentukan berdasarkan harga tingkat kejenuhan karbon. Silikon ditambahkan sekitar 1,3 – 2,3% untuk menggalakan pembentukan grafit. Silikon sendiri di dalam besi cor menempatkan diri di dalam ferrit.

- **Pengaruh Fosfor (P)**

Fosfor di dalam besi cor putih akan membentuk senyawa  $Fe_3P$ . Fosfor diperlukan untuk pembuatan benda cor tipis, namun pemberian terlalu banyak bisa mengakibatkan timbulnya lubang-lubang kecil pada permukaan maka kandungan fosfor dibatasi antara 0,2–2,0%. Penambahan kandungan fosfor mengurangi kelarutan karbon dan memperbanyak sementit pada kandungan karbon yang tetap sehingga struktur menjadi keras dan sementit suka terurai.

- **Pengaruh Mangan (Mn)**

Seperti Si terkandung di dalam semua bahan besi dan dibutuhkan dalam jumlah besar pada jenis istimewa. Mangan berfungsi untuk meningkatkan kekuatan, kekerasan, ketahanan aus dan kekuatan pada pengerjaan dingin.

- **Pengaruh Chromium (Cr)**

Merupakan unsur terpenting untuk meningkatkan kekerasan, keuletan, ketahanan aus, tahan panas seta karat dan asam.

- **Pengaruh Nikel (Ni)**

Fungsi nikel sendiri untuk meningkatkan keuletan, kekuatan, pengerasan menyeluruh, ketahanan karat, dan menurunkan kecepatan pendinginan.

- **Pengaruh *Molybdenum* (Mo)**

Kebanyakan dipadukan dengan besi/baja dalam ikatan dengan Cr, Ni, V. Molybdenum sendiri berfungsi untuk meningkatkan kekuatan tarik, tahan panas, kerapuhan pelunakan.

## 2.5 Struktur Mikro Besi Cor

Struktur dari besi cor akan mempengaruhi pada sifat–sifat mekanik dan juga sifat fisik dari besi tersebut. Beberapa struktur yang ada di dalam besi cor adalah sebagai berikut :

- **Grafit**

Grafit adalah kumpulan karbon yang dihasilkan selama proses pembekuan dan pendinginan lambat. Grafit memiliki kekerasan sekitar 1 HB. Grafit memberikan pengaruh sangat besar terhadap sifat – sifat mekanik besi cor. Grafit dalam besi cor dapat berada dalam keadaan bebas sebagai grafit. Grafit ini merupakan suatu bentuk kristal karbon yang lunak dan rapuh. Dalam struktur besi cor jumlahnya dapat mencapai 85% dari seluruh bentuk kandungan karbon.

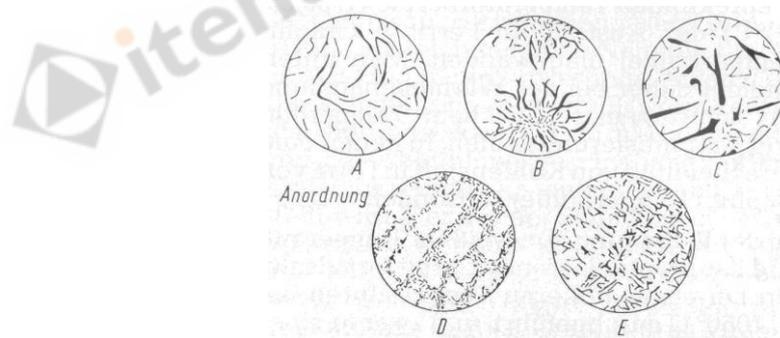
Sifat mekanik dari besi cor banyak dipengaruhi oleh bentuk, ukuran, distribusi dan banyaknya grafit di dalamnya. Besi

cor bergrafit bulat memiliki kekuatan lebih baik dibandingkan dengan besi cor bergrafit serpih. Hal ini disebabkan karena serpih grafit akan mengalami pemusatan tegangan pada ujung – ujungnya bila mendapatkan gaya akan bekerja tegak lurus arah serpih.

Dalam struktur mikro ada berbagai bentuk dan ukuran dari potongan – potongan grafit yaitu halus dan besar, serpih atau asteroid, bergumpal atau bulat. Keadaan potongan – potongan grafit ini memberikan pengaruh yang besar terhadap sifat mekanik besi cor. Karakteristik grafit di dalam besi cor dikelompokkan dalam bentuk, distribusi dan ukuran.

### Distribusi Grafit

Bentuk dan distribusi grafit erat kaitannya dengan proses perlakuan peleburan bertujuan untuk mencegah terjadinya *undercooling*. Gambar berikut menunjukkan beberapa distribusi grafit



Gambar 2.5 Distribusi Grafit

Sumber : <https://hapli.wordpress.com/forum-ferro/besi-cor/>

**Distribusi grafit A** dimiliki oleh besi cor kelas tinggi dengan matrik perlit.

**Distribusi grafit B** kecendrungan terjadi pada coran tipis, untuk kandungan karbon atau silikon relatif rendah. Besi cor yang memerlukan kekuatan tarik 25-30 kg/mm<sup>2</sup> diperbolehkan memiliki distribusi grafit B sebanyak 20-30%.

**Distribusi grafit C** pada struktur ini grafit yang panjang dan lebar numpuk dan dikelilingi oleh serpihan grafit yang mengkristal di daerah eutektik. Struktur demikian begitu lemah mengakibatkan hasil produksi kurang kuat.

**Distribusi grafit D** terjadi karena potongan–potongan grafit eutektik yang halus, yang mengkristal diantara dendrit–dendrit kristal mulai dari austenit karena pendinginan lanjut (*undercooling*) pada pembekuan eutektik. Distribusi grafit semacam ini terkadang muncul pada besi cor yang teroksidasi.

**Distribusi grafit E** muncul pada kandungan karbon rendah. Kekuatan rendah karena jarak yang dekat antara potongan–potongan grafit seperti pada distribusi D. Tetapi terkadang kekuatan juga tinggi apabila kandungan karbon rendah dan berkurangnya endapan grafit.

## 2.6 *Grinding Ball*

*Grinding ball* adalah salah satu jenis perangkat (komponen) yang terdapat pada mesin *cement mill* dimana proses penggilingan material bahan dasar untuk pembuatan semen dilakukan. Material *grinding ball* harus memiliki kekerasan, ketangguhan dan ketahanan *abrasive* yang tinggi.

Dalam *Cement Mill*, *Grinding ball* berfungsi sebagai bahan pengisi yang berfungsi untuk menghancurkan bahan baku semen. Pada *Cement Mill* dilakukan penambahan *additive*, seperti *gypsum* atau *trash* sebagai *retarder agent* yang berfungsi untuk memperlambat waktu pengikatan dan pengerasan semen dan dimaksudkan untuk mendapatkan semen dengan kehalusan yang telah dipersyaratkan dalam Standard Nasional Indonesia.

Bahan yang sesuai dan memenuhi persyaratan *grinding ball* adalah logam yang mengandung Fe, yaitu besi/baja. Besi/baja memiliki sifat yang bervariasi, mulai dari sifat yang paling lunak hingga paling keras serta memiliki sifat mampu bentuk yang baik dalam proses pengecoran sehingga

berbagai macam bentuk coran dapat dibuat dengan pengecoran. (Tata Surdia & Saito, 2000).



Gambar 2.6 Grinding Ball

(Tohoma, 2012)

## 2.7 Karakteristik *Grinding Ball*

### **Besi Tuang Putih (*White Cast Iron*)**

Besi tuang putih adalah besi tuang yang keras dan rapuh dan tidak dapat dikerjakan mesin dengan baik. Besi jenis ini merupakan satu-satunya jenis besi tuang dengan unsur karbon yang membentuk karbida (Singh, 2009). Besi tuang dengan kandungan paduan tinggi bertujuan untuk memperbaiki ketahanan terhadap korosi, panas, dan untuk pemakaian alat permesinan. Besi jenis ini juga memiliki kandungan unsur paduan total yang biasanya tidak melebihi sekitar 3% atau 4% (Rosenbreg, 1968). Karakteristik sifat mekanik dari besi tuang putih ditunjukkan pada Tabel di bawah ini

Tabel 2.1 Karakteristik sifat mekanik dari besi tuang putih  
(Rajan et al, 1997)

Sifat mekanik	
Besaran Kekerasan (BHN)	375-600
Kekuatan Tarik (MPa)	140-490
Kekuatan Tekan(MPa)	1400-1750

Hampir sebagian besar *grinding ball* yang digunakan pada pabrik semen di Indonesia berasal India dan Cina. *Grinding ball* asal India termasuk ke dalam kategori *high chromium white cast iron* dengan nilai kekerasan rata-rata 616 BHN dan nilai kekerasan *grinding ball* asal Cina yaitu 442 BHN yang termasuk dalam kategori *low alloy high carbon steel* (Nurjaman dkk, 2012). Komposisi dari *grinding ball* ditunjukkan pada Tabel 2.2.

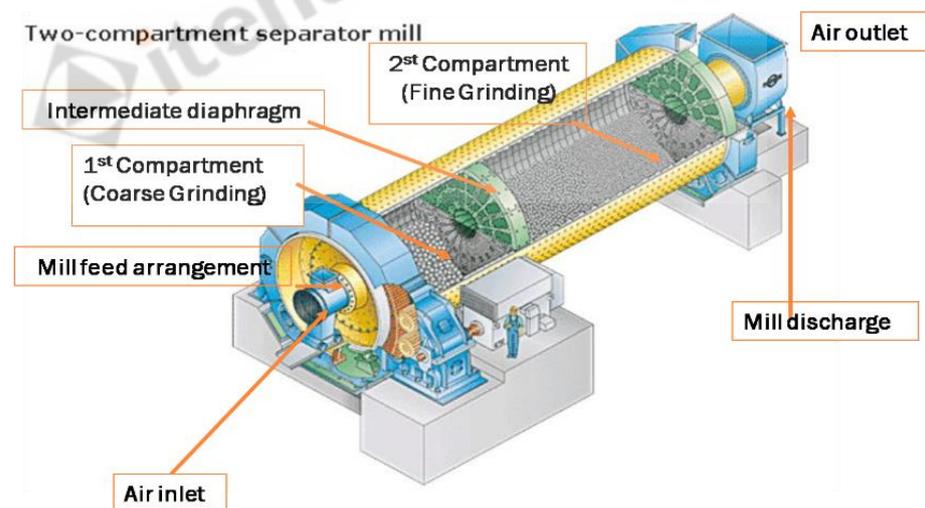
Tabel 2.2 Komposisi kimia *grinding ball* impor asal India dan Cina  
(Nurjaman et al, 2012).

Unsur	Kadar (%)	
	Asal India	Asal Cina
C	2,23	0,839
Si	0,314	0,331
S	0,07	0,42
P	0,134	0,035
Mn	0,431	0,522
Ni	0,132	0,073
Cr	14,1	0,678
Mo	0,078	0,012
Cu	0,043	0,249
Fe	Bal.	Bal.

Karakteristik *grinding ball import* yang digunakan oleh pabrik semen di Indonesia pada PT. Semen Gresik Tbk dari dua merk berbeda, yaitu merk A (diameter 30 mm) dan merk B (diameter 40 mm). Hasil uji komposisi kimia menunjukkan bahwa *ball mill* impor diameter 30 mm mengandung 2,934%C 11,231%Cr 0,117%Mo sedangkan diameter 40 mm mengandung 2,693%C 12,313%Cr 1,103%Mo termasuk dalam kelompok Besi tuang putih martensit ASTM A532 Tipe II A. Hasil pengamatan foto struktur mikro menunjukkan bahwa struktur terdiri dari perlit, karbida, dan martensit. (Kartikasari dkk, 2007).

## 2.8 Cement Mill

Salah satu tahap proses penggilingan akhir di pabrik semen adalah *cement mill*. Kebanyakan yang digunakan untuk penggilingan semen adalah *tube mill/horizontal mill*. Pada *cement mill clinker* digiling bersama dengan *gypsum* serta bahan *additive* lain seperti *limestone*, *fly ash*, *trass*, dan *pozzolan* tergantung dari tipe semen yang akan diproduksi. Tube mill sendiri adalah peralatan berbentuk silinder yang di dalamnya terdapat *steel ball* sebagai media grinding/penggilingan. Tube mill terdiri atas 2 (dua) chamber/ruang, Chamber 1 untuk pengeringan dan coarse grinding atau penggilingan kasar dan Chamber 2 untuk penggilingan halus. Proses penghalusan/penggilingan raw material menggunakan *grinding* media yang berupa *steel ball* yang memiliki ukuran diameter yang bervariasi, *steel ball* berbentuk bola yang terbuat dari material yang tersusun atas unsur C (karbon), Cr (Kromium) dan Mo (Molibdenum), dengan komposisi yang berbeda-beda sesuai dengan ukuran diameter steel ballnya.

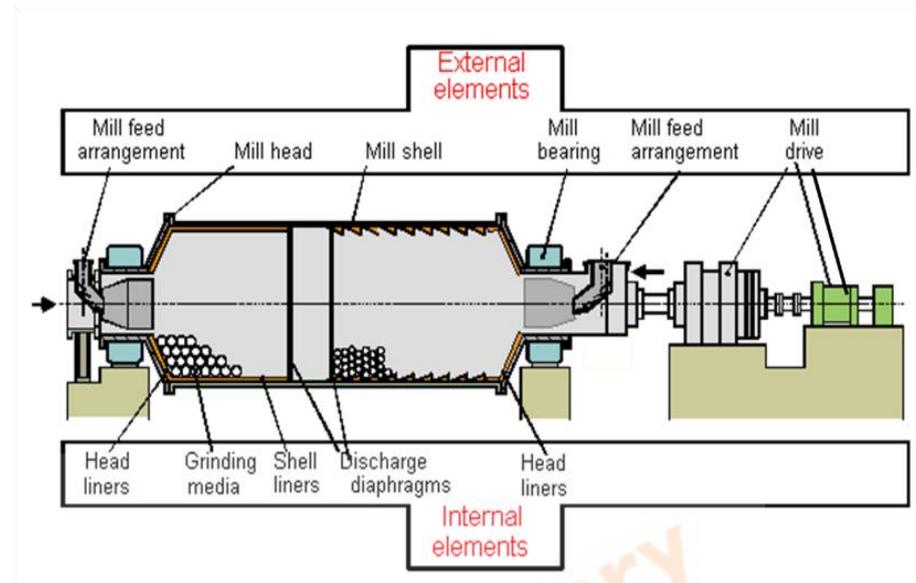


Gambar 2.7 Cement Mill Chamber

(Maul Hidayat, 2013)

Selain itu didalam *tube mill* juga terdapat *liner* yang berfungsi untuk melindungi permukaan bagian dalam *mill* dari *grinding* media/ *steel ball*, *liner* juga berfungsi untuk mengangkat *stell ball* untuk menghasilkan

efek tumbukan/impak dan efek penggerusan pada material, sehingga dihasilkan material yang halus. (Maul Hidayat,2013).



Gambar 2.8 *Cement Mill Part*  
(Maul Hidayat, 2013)

## 2.9 Heat Treatment

*Heat treatment* (perlakuan panas) adalah proses pemanasan dan pendinginan yang terkontrol dengan maksud mengubah sifat fisik dari logam. Prosedur dari perlakuan panas tersebut adalah berbeda - beda tergantung tujuan dari pemberian proses perlakuan tersebut, yang biasanya mengacu pada sifat - sifat mekanik dari pada material benda kerja. Langkah pertama dalam proses heat treatment adalah pemanasan logam atau paduan dalam temperatur yang berbeda - beda dan dengan atau tanpa memberikan waktu penahanan (*holding time*), yang kemudian dilanjutkan dengan mendinginkannya dengan laju pendinginan yang diinginkan. Temperatur pengerasan sangat tergantung pada kadar karbon, dan temperatur pengerasan turun jika kadar karbon naik. Ada beberapa proses *heat treatment*, diantaranya adalah annealing, normalizing, hardening, dan tempering. (Callister, 2000 & Surdia dan Saito, 2000).

## 1. *Quenching*

Quenching (celup cepat) adalah salah satu perlakuan panas dengan laju pendinginan cepat yang dilakukan dalam suatu media pendingin misal air atau oli. Untuk memperoleh sifat mekanik yang lebih keras. Untuk baja karbon rendah dan baja karbon sedang lazim dilakukan pencelupan dengan air. Untuk baja karbon tinggi dan baja paduan biasanya digunakan minyak (oli) sebagai media pencelupan, pendinginannya tidak secepat air. Tersedia berbagai jenis minyak, seperti minyak mineral dengan kecepatan pendinginan yang berlainan sehingga dapat diperoleh baja dengan berbagai tingkat kekerasan. Untuk pendinginan yang cepat dapat digunakan air garam atau air yang disemprotkan. Beberapa jenis logam dapat dikeraskan melalui pendinginan udara terlalu lambat. Benda yang agak besar biasanya dicelup dalam minyak. Suhu media celup harus merata agar dapat dicapai pendinginan yang merata pula.

## 2. *Tempering*

Tujuan tempering adalah menghilangkan tegangan sisa akibat *hardening* yang bisa menimbulkan retak dan untuk mengembalikan ketangguhan bahan, yaitu dengan cara memanaskan sampai temperature tertentu yang lebih rendah dari temperatur *hardening*. Penemperan didefinisikan sebagai proses pemanasan logam setelah dikeraskan (quenching) pada temperatur tempering (di bawah suhu kritis) sehingga diperoleh sifat mudah dibentuk secara tertentu, yang dilanjutkan dengan proses pendinginan. Prosesnya adalah memanaskan kembali berkisar antara suhu 150-650°C dan didinginkan secara perlahan-lahan tergantung sifat akhir baja tersebut.

### 2.10 Uji Keras

Bertujuan untuk mengevaluasi kekerasan suatu material, dengan cara melihat ketahanan suatu material terhadap deformasi plastis, semakin

tahan material tersebut terhadap deformasi plastis maka material tersebut semakin keras.

- Metoda Penekanan

Ada beberapa metoda penekan yang sering dilakukan.

a. Metoda Brinnell

Prinsip pengujian yaitu dengan menekan indentor bola baja yang berdiameter 10 mm ke permukaan benda kerja, permukaan benda kerja (spesimen uji) harus rata dan bebas dari kotoran. Besarnya gaya penekanan (P) harus lebih besar dari batas luluh dari benda kerja agar terjadi deformasi elastis berupa jejak bebas penekanan. Ukuran jejak sangat tergantung kepada besar kecilnya gaya P yang diberikan. Prinsip harga kekerasan menurut

$$\text{brinnell : BHN} = \frac{P}{A} \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

b. Rockwell

Pengujian rockwell memiliki dua beban :

1. Beban minor : harganya tetap 10kg, berfungsi untuk penekanan awal, agar kotoran dan kerak atau logam-logam sisa pemotongan tidak terhitung kedalam harga kekerasan.
2. Beban mayor : harganya berubah-ubah tergantung kepada skala yang digunakan dan jenis indentor yang digunakan.

Prinsip pengujian :

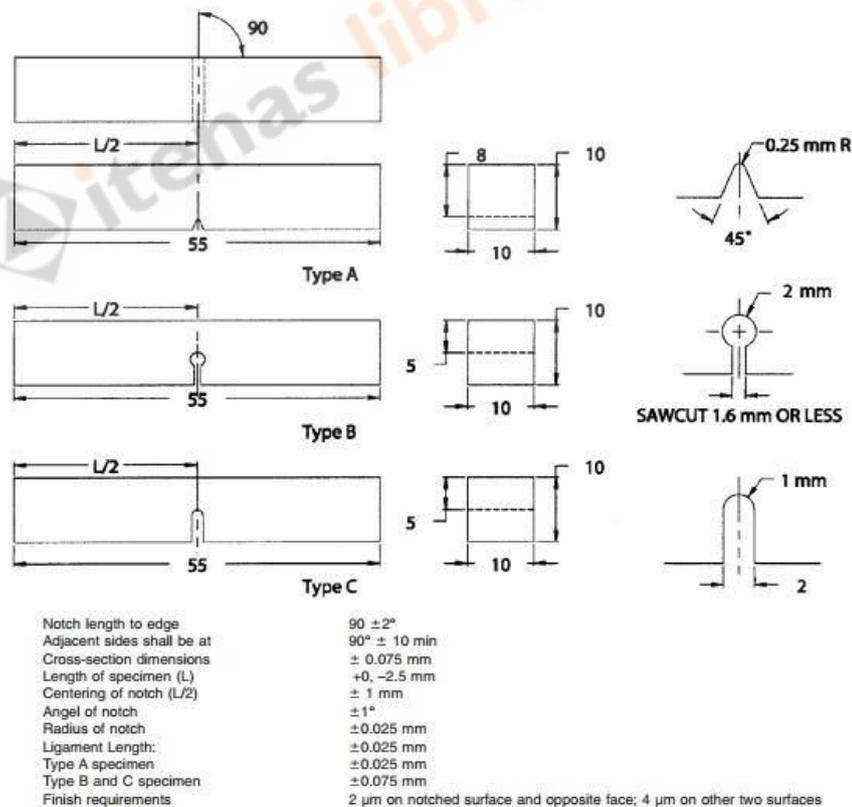
- Tahap I : menerapkan beban minor 10kg, dengan waktu penekanan sekitar 10 detik (untuk aliran material) dial indicator diseting nol.
- Tahap II : menerapkan beban mayor, yang bebannya tergantung skala yang digunakan, penetrator menusuk benda kerja lebih dalam.

## 2.11 Uji Impak

Tujuan pengujian impact :

1. Melihat ketahanan material terhadap pembebanan yang tiba-tiba (impak).
2. Untuk melihat apakah material tersebut ulet atau getas, hal ini dapat dilihat dari harga impact (HI) dimana untuk material yang ulet HI yang tinggi dan untuk material yang getas memiliki HI yang rendah. Ulet dan getas juga dapat dilihat dari bentuk patahan hasil pengujian. Untuk yang ulet bentuk patahan berserabut sedangkan yang getas mengkilat.
3. Untuk menentukan temperatur transisi dari material, temperatur transisi adalah temperatur peralihan antara patah ulet dan patah getas.

$$\text{Persamaan harga impact : } HI = \frac{E}{A}$$



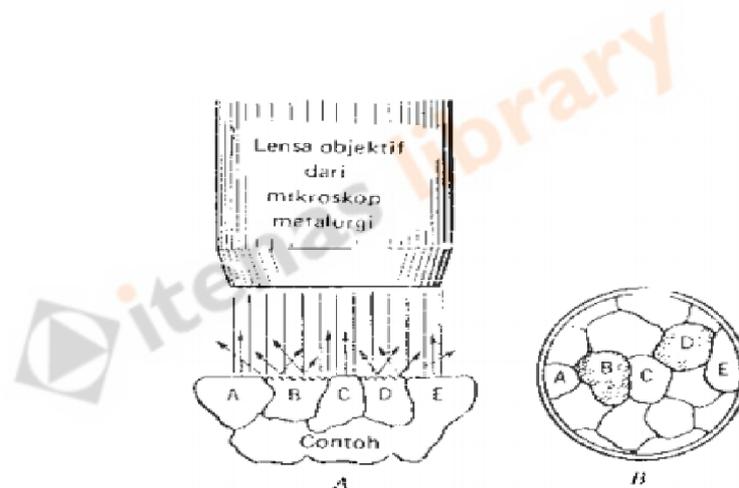
Gambar 2.9 Dimensi spesimen berdasarkan standar ASTM E-23

## 2.12 Uji Struktur Mikro

Struktur bahan dalam orde kecil sering disebut struktur mikro. Struktur ini tidak dapat dilihat dengan mata telanjang, tetapi dapat dilihat dengan menggunakan alat pengamat struktur mikro diantaranya mikroskop electron, mikroskop field ion, mikroskop field emission, dan mikroskop sinar-X.

penelitian ini menggunakan mikroskop cahaya, adapun manfaat dari pengamatan struktur mikro ini adalah:

1. Mempelajari hubungan antara sifat-sifat bahan dengan struktur dan cacat pada bahan.
2. Memperkirakan sifat bahan jika hubungan tersebut sudah diketahui.



Gambar 2.10 Pemeriksaan benda uji dengan mikroskop metalurgi

- A. Contoh yang dietsa sedang diperiksa dengan mikroskop
- B. Penampilan contoh melalui mikroskop

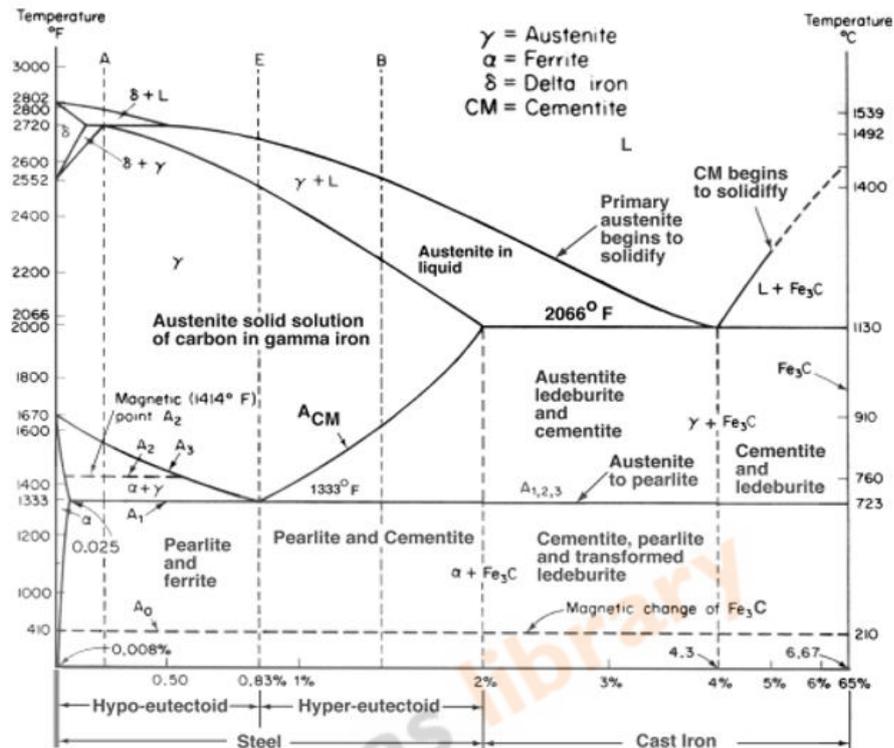
Persiapan yang harus dilakukan sebelum mengamati struktur mikro adalah pemotongan spesimen, pengampelasan dan pemolesan dilanjutkan pengetsaan. Setelah dipilih bahan uji dan diratakan kedua permukaannya, setelah memastikan rata betul kemudian dilanjutkan dengan proses pengampelasan dengan nomor kekasaran yang berurutan dari yang paling kasar (nomor kecil) sampai yang halus (nomor besar). Arah pengampelasan tiap tahap harus diubah, pengampelasan yang lama

dan penuh kecermatan akan menghasilkan permukaan yang halus dan rata. pemolesan dilakukan dengan autosol yaitu metal polish, bertujuan agar didapat permukaan yang rata dan halus tanpa goresan sehingga terlihat mengkilap seperti kaca. Langkah terakhir sebelum melihat struktur mikro adalah dengan mencelupkan spesimen dalam larutan etsa dengan posisi permukaan yang di etsa menghadap keatas. Selama pencelupan akan terjadi reaksi terhadap permukaan spesimen sehingga larutan yang menyentuh spesimen harus segar/baru, oleh karena itu perlu digerak-gerakkan. Kemudian spesimen dicuci, dikeringkan dan dilihat atau difoto dengan mikroskop logam. Pemeriksaan struktur mikro memberikan informasi tentang bentuk struktur, ukuran dan banyaknya bagian struktur yang berbeda.

### 2.13 Diagram Fasa

Diagram fasa merupakan diagram yang menghubungkan temperatur, komposisi kimia, dan fasa. Pada proses pendinginan yang sangat lambat perubahan fasa akan berlangsung seperti pada diagram fasa, akan tetapi kondisi seperti itu hampir tidak pernah tercapai karena pada kondisi normal pendinginan berlangsung lebih cepat dari waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya perubahan fasa seperti yang tercantum dalam diagram fasa. Akibatnya, difusi atom tidak dapat berlangsung sempurna sehingga terbentuk fasa yang berbeda pada temperatur kamar. Paduan besi dan karbon terdapat fasa karbida yang disebut sementit dan grafit, untuk grafit lebih stabil dari pada sementit, Sementit mempunyai kadar C = 6,67 %. (Tata Surdia dan Shinroku Saito, 1985).

## 1. Diagram Keseimbangan Fasa Fe-C



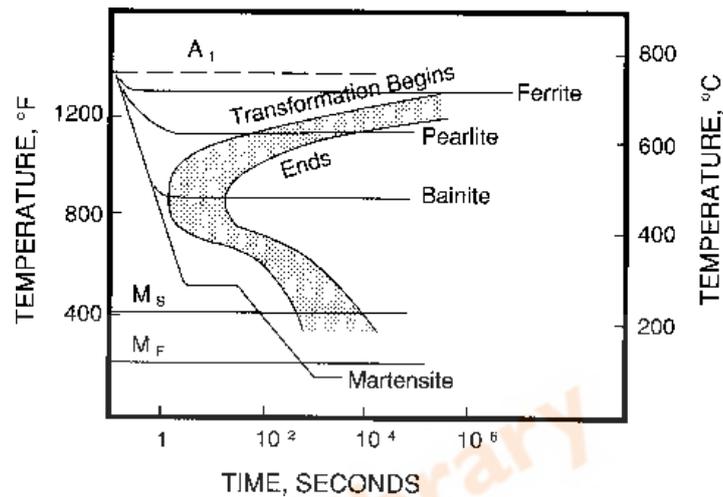
Gambar 2.11 Diagram Keseimbangan Fasa Fe-C

(Sinha, 2003)

1. Semakin tinggi kadar karbon maka cementit atau karbida besi (Fe<sub>3</sub>C) dari baja tersebut semakin banyak.
2. Semakin banyak karbida besi maka baja tersebut semakin keras dan getas.
3. Sel satuan dari Fe<sub>3</sub>C adalah ortorombik.
4. Baja hipo dan baja hiper di bedakan dari struktur mikronya, dimana untuk baja hipo jumlah cementitnya lebih sedikit di banding baja hiper, sehingga kekerasan baja hiper lebih tinggi di banding baja hipo. (Material Teknik, 2014)

## 2. Diagram TTT dan CCT

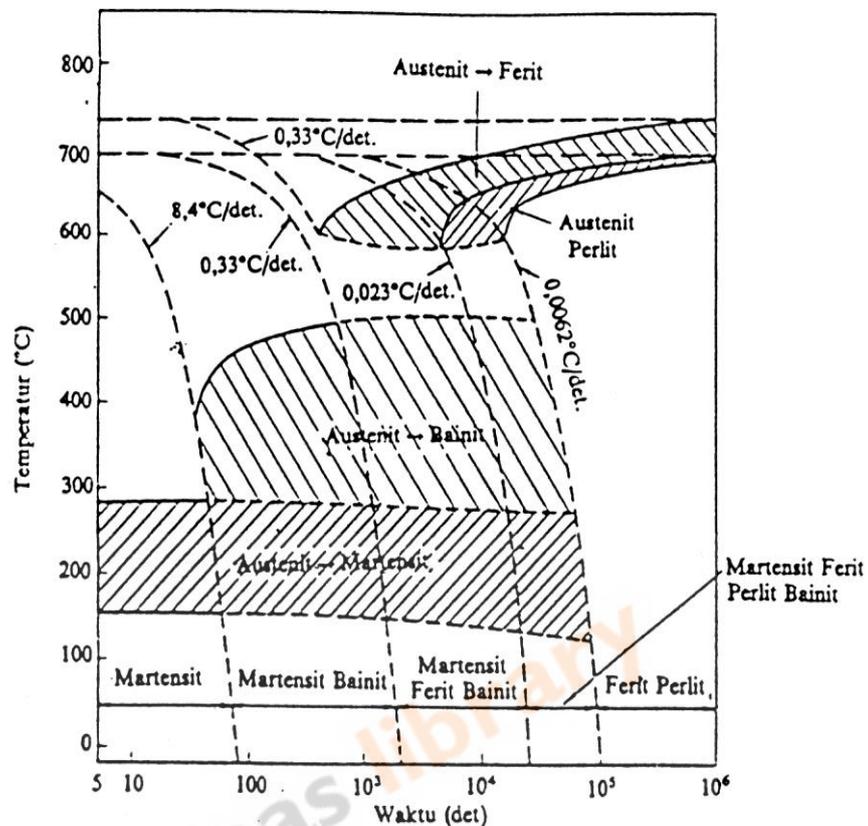
Untuk menentukan laju reaksi perubahan fasa yang terjadi dapat diperoleh dari diagram TTT (*Time Temperature Transformation*). Diagram TTT untuk besi cor kelabu di tunjukkan oleh gambar 2.12.



Gambar 2.12 Diagram TTT untuk besi cor kelabu

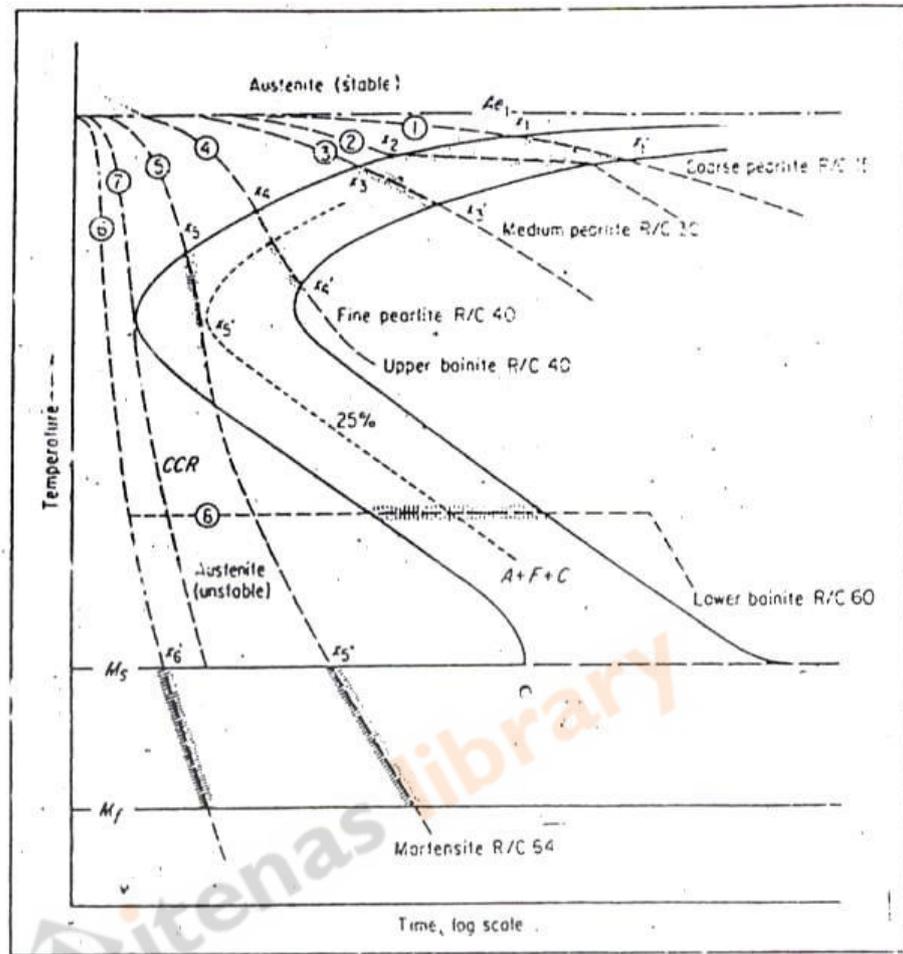
Dari gambar diatas menunjukkan bentuk hidung (*nose*) sebagai batasan waktu minimum dimana sebelum waktu tersebut bertransformasi austenit ke perlit tidak akan terjadi. Posisi hidung dari diagram TTT dapat bergeser menurut kadar karbon. Posisi hidung bergeser makin kekanan yang berarti baja karbon itu makin mudah untuk membentuk bainit/martensit atau makin mudah untuk dikeraskan. Sedangkan  $M_s$  merupakan temperatur awal mulai terbentuknya fasa martensit dan  $M_f$  merupakan temperatur akhir dimana martensit masih bisa terbentuk.

Untuk mendapatkan hubungan antara kecepatan pendinginan dan struktur mikro (fasa) yang terbentuk biasanya dilakukan dengan menggabungkan diagram kecepatan pendinginan kedalam diagram TTT yang dikenal dengan diagram CCT (*Continuous Cooling Transformation*).



Gambar 2.13 Diagram CCT (*Continuous Cooling Transformation*)

Pada contoh gambar diagram diatas menjelaskan bahwa bila kecepatan pendinginan naik berarti bahwa waktu pendinginan dari suhu austenit turun, struktur akhir yang terjadi berubah dari campuran ferit-perlit ke campuran ferit-perlit-bainit- martensit, ferit-bainit-martensit, kemudian bainit-martensit dan akhirnya pada kecepatan yang tinggi sekali struktur yang terjadi adalah martensit.



Gambar 2.14 Kurva Pendinginan pada Diagram TTT (*Time Temperature Transformation*)

Dari diagram pendinginan diatas dapat dilihat bahwa dengan pendinginan cepat (kurva 6) akan menghasilkan struktur martensite karena garis pendinginan lebih cepat dari pada kurva 7 yang merupakan laju pendinginan kritis (critical cooling rate) yang nantinya akan tetap terbentuk fase austenite (unstable). Sedangkan pada kurva 6 lebih cepat dari pada kurva 7, sehingga terbentuk struktur martensite yang keras, tetapi bersifat rapuh karena tegangan dalam yang besar.

Fase-fase yang terjadi pada baja antara lain :

### **1. Ferrite**

Ferrite adalah fase larutan padat yang memiliki struktur BCC (*body centered cubic*). Ferrite dalam keadaan setimbang dapat ditemukan pada temperatur ruang, yaitu alpha-ferrite atau pada temperatur tinggi, yaitu deltaferrite. Secara umum fase ini bersifat lunak (soft), ulet (ductile), dan magnetik (magnetic) hingga temperatur tertentu, yaitu T. Kelarutan karbon di dalam fase ini relatif lebih kecil dibandingkan dengan kelarutan karbon di dalam fase larutan padat lain di dalam baja, yaitu fase Austenite. Pada temperatur ruang, kelarutan karbon di dalam alpha-ferrite hanyalah sekitar 0,05%.

Berbagai jenis baja dan besi tuang dibuat dengan mengeksploitasi sifat-sifat ferrite. Baja lembaran berkadar karbon rendah dengan fase tunggal ferrite misalnya, banyak diproduksi untuk proses pembentukan logam lembaran. Dewasa ini bahkan telah dikembangkan baja berkadar karbon ultra rendah untuk karakteristik mampu bentuk yang lebih baik. Kenaikan kadar karbon secara umum akan meningkatkan sifat-sifat mekanik ferrite sebagaimana telah dibahas sebelumnya. Untuk paduan baja dengan fase tunggal ferrite, faktor lain yang berpengaruh signifikan terhadap sifat-sifat mekanik adalah ukuran butir.

### **2. Austenite**

Fase Austenite memiliki struktur atom FCC (*Face Centered Cubic*). Dalam keadaan setimbang fase Austenite ditemukan pada temperatur tinggi. Fase ini bersifat non magnetik dan ulet (ductile) pada temperatur tinggi. Kelarutan atom karbon di dalam larutan padat Austenite lebih besar jika dibandingkan dengan kelarutan atom karbon pada fase Ferrite. Secara geometri, dapat dihitung perbandingan besarnya ruang intertisi di dalam fase Austenite (atau kristal FCC) dan fase Ferrite (atau kristal BCC). Perbedaan ini dapat digunakan untuk

menjelaskan fenomena transformasi fase pada saat pendinginan Austenite yang berlangsung secara cepat. Selain pada temperatur tinggi, Austenite pada sistem Ferrous dapat pula direkayasa agar stabil pada temperatur ruang. Elemen-elemen seperti Mangan dan Nickel misalnya dapat menurunkan laju transformasi dari gamma-austenite menjadi alpha-ferrite.

### 3. Cementite

Cementite atau carbide dalam sistem paduan berbasis besi adalah stoichiometric inter-metallic compound Fe-C yang keras (hard) dan getas (brittle). Nama cementite berasal dari kata caementum yang berarti *stone chip* atau lempengan batu. Cementite sebenarnya dapat terurai menjadi bentuk yang lebih stabil yaitu Fe dan C sehingga sering disebut sebagai fase metastabil. Namun, untuk keperluan praktis, fase ini dapat dianggap sebagai fase stabil. Cementite sangat penting perannya di dalam membentuk sifat-sifat mekanik akhir baja. Cementite dapat berada di dalam sistem besi baja dalam berbagai bentuk seperti: bentuk bola (sphere), bentuk lembaran (berselang seling dengan alpha-ferrite), atau partikel-partikel carbide kecil. Bentuk, ukuran, dan distribusi karbon dapat direkayasa melalui siklus pemanasan dan pendinginan.

### 4. Pearlite

Pearlite adalah suatu campuran lamellar dari ferrite dan cementite. Konstituen ini terbentuk dari dekomposisi austenite melalui reaksi eutectoid pada keadaan setimbang, di mana lapisan ferrite dan cementite terbentuk secara bergantian untuk menjaga keadaan kesetimbangan komposisi eutectoid. Pearlite memiliki struktur yang lebih keras daripada ferrite, yang terutama disebabkan oleh adanya fase cementite atau carbide dalam bentuk lamel-lamel.

## 5. Martensite

Martensite adalah mikro konstituen yang terbentuk tanpa melalui proses difusi. Konstituen ini terbentuk saat austenite didinginkan secara sangat cepat, misalnya melalui proses quenching pada medium air. Transformasi berlangsung pada kecepatan sangat cepat, mendekati orde kecepatan suara, sehingga tidak memungkinkan terjadi proses difusi karbon. Martensite yang terbentuk berbentuk seperti jarum yang bersifat sangat keras (*hard*) dan getas (*brittle*). Fase martensite adalah fase metastabil yang akan membentuk fase yang lebih stabil apabila diberikan perlakuan panas. Martensite yang keras dan getas diduga terjadi karena proses transformasi secara mekanik (geser) akibat adanya atom karbon yang terperangkap pada struktur kristal pada saat terjadi transformasi polimorf dari FCC ke BCC. Hal ini dapat dipahami dengan membandingkan batas kelarutan atom karbon di dalam FCC dan BCC serta ruang intertisi maksimum pada kedua struktur kristal tersebut. Akibatnya terjadi distorsi kisi kristal BCC menjadi BCT (*Body Centered Tetragonal*).

Meskipun memiliki kekerasan yang sangat tinggi, Martensite tidak memiliki arti penting di dalam aplikasi rekayasa. Untuk kebanyakan aplikasi rekayasa martensite perlu ditemper atau dipanaskan kembali pada temperature tertentu untuk mengurangi kegetasan (*brittleness*) dan meningkatkan ketangguhannya (*toughness*) ke tingkat yang dapat diterima tanpa terlalu banyak menurunkan kekerasannya.

Fasa-fasa pada baja memiliki sifat-sifat khas yang dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2.3 Fasa Yang Ada Pada Baja (Tata Surdia dan Shinroku Saito, 1985).

	Fasa dan Simbol	Struktur	Penjelasan
Menurut Kristal	Austenit ( $\gamma$ )	FCC	Paramagnetik dan stabil pada temperatur tinggi.
	Ferit ( $\alpha$ )	BCC	Stabil pada temperatur rendah, kelarutan padat terbatas, dapat berada bersama $\text{Fe}_3\text{C}$ (sementit) atau lainnya
	Bainit ( $\alpha'$ )	BCC	Austenit metastabil didinginkan dengan laju pendingin cepat tertentu. Terjadi hanya presipitasi $\text{Fe}_3\text{C}$ , unsur paduan lainnya tetap larut.
	Martensit ( $\alpha''$ )	BCT	Fasa metastabil terbentuk dengan media pendingin cepat, semua unsur paduan masih larut Dalam keadaan padat.
Menurut keadaan	Perlit		Lapisan ferit dan $\text{Fe}_3\text{C}$ .
	Widmanstaetten		$\alpha$ dan $\gamma$ dalam orientasi pada presipitasi ferit.
	Dendrit		Berbentuk cabang-cabang seperti pohon, struktur ini terbentuk karena segregasi karbon pada pembekuan. Sorbit adalah perlit halus dan trostit adalah bainit.
	Sorbit		Nama ini tidak banyak dipakai.

#### 2.14 Proses Pembuatan Grinding Ball Dengan Metode Pengecoran

Logam Proses pembuatan grinding ball, seperti yang tampak, terbagi ke dalam empat tahapan yaitu:

1. pembuatan pola (*pattern*)

pola terbuat dari kayu keras, dimana pola ini terdiri dari gating system dan grinding ball berukuran  $\text{Ø}50$  mm, dimana keduanya terbagi menjadi dua bagian (*parting line*),

2. Pembuatan cetakan

Pembuatan menggunakan pasir cetak (*sand mold*), dimana pasir kuarsa (96%  $\text{SiO}_2$ ) sebanyak 92% dicampur dengan perekat berupa bentonit sebanyak 5% dan air sebanyak 3% diaduk dalam sebuah mesin *double screw mixer* selama kurang lebih 15 menit. Cetakan ini terdiri dari dua buah *flask (cope and drag)*, kemudian pasir cetak dan pola dipadatkan dalam masing-masing *flask* tersebut.

### 3. Proses peleburan

Bahan baku berupa scrap besi dan unsur-unsur paduan (ferro chrom, ferro molybdenum, ferro vanadium, ferro boron) dilebur menggunakan tungku induksi dengan kapasitas 500 Kg/heat.

### 4. proses pembongkaran cetakan

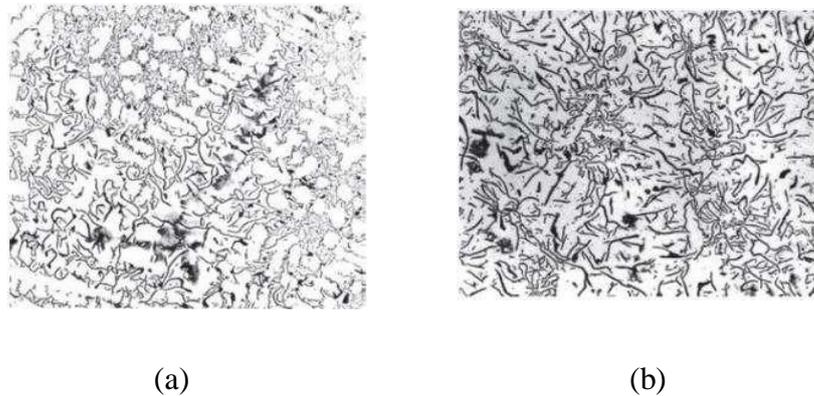
Setelah logam cair dengan komposisinya dituang ke dalam cetakan dan membeku, selanjutnya dilakukan pembongkaran cetakan, dimana benda cor dipisahkan dari pasir cetak dan dibersihkan dengan menggunakan mesin *shot blasting*.

## 2.15 Inokulasi

Inokulasi merupakan bagian penting pada proses pembuatan besi cor berkualitas tinggi. Secara umum proses ini bertujuan untuk meningkatkan jumlah inti pembekuan sehingga dengan demikian akan meningkatkan pula jumlah grafit eutektik, mengurangi “*under cooling*” serta menurunkan tendensi terbentuknya struktur pembekuan putih (ledeburit).

Proses inokulasi diperlukan baik pada pembuatan besi cor kelabu maupun besi cor nodular. Walaupun inokulasi memiliki efek yang sama terhadap kedua material tersebut, namun secara spesifik masing-masing memiliki penjelasan yang agak berbeda.

Bahan inokulasi atau inokulan merupakan partikel-partikel padat ataupun unsur-unsur yang segera bersenyawa dengan O<sub>2</sub> serta membentuk partikel padat yang dibubuhkan kedalam cairan. Partikel-partikel ini segera akan berfungsi sebagai inti pada pertumbuhan baik grafit lamelar ataupun grafit bulat. Unsur-unsur pembentuk partikel ini dicampurkan dalam bahan pembawanya yaitu grafit (*graphite based inoculants*), *ferrosilicon* (FeSi *based inoculants*) atau calcium silicide (CaSi *based inoculants*). Bahan inokulan yang populer saat ini adalah FeSi *based inoculants* dengan kandungan unsur antara lain Al, Ba, Ca, Sr dan Zr.



Gambar 2.15 (a) tanpa inokulasi (b) dengan inokulasi  
(Buku Struktur Mikro, 2016)

Kekurangan atau bahkan tanpa proses inokulasi akan menyebabkan besi cor cenderung membeku secara metastabil sehingga memunculkan struktur putih (ledeburit). Struktur ini keras serta memiliki machinability yang sangat buruk sehingga selalu dihindari. Sebagian unsur C yang bersenyawa dengan Fe menjadi karbida sehingga membentuk struktur ledeburit, juga mengakibatkan struktur besi cor menjadi kekurangan grafit yang secara langsung akan mengurangi tingkat pemuai grafit sehingga meningkatkan potensi shrinkage. Walaupun karbida ledeburit dapat diuraikan menjadi grafit melalui proses heat treatment, namun hal ini hanya akan meningkatkan biaya proses.

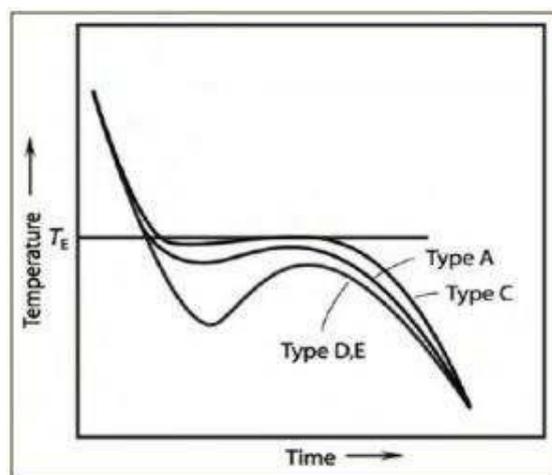
### 1. Inokulasi Pada Besi Cor

Besi cor kelabu hipoeutektik, khususnya untuk diaplikasikan sebagai komponen dengan tuntutan tinggi harus diinokulasi. Efek dari inokulasi pada material ini adalah meningkatkan jumlah sel-sel eutektik yang terbentuk pada saat solidifikasi eutektik. Pada sel-sel inilah terdapat grafit. Hasilnya adalah struktur eutektik yang lebih halus serta meningkatkan sifat-sifat mekanik besi cor kelabu tanpa adanya peningkatan kekerasan yang berarti.

Banyaknya sel-sel eutektik yang terbentuk juga menyebabkan pertumbuhan grafit dan austenite pada eutektik lebih cepat dari pada

pertumbuhan karbida dan austenit pada eutektik yang ditunjukkan dengan semakin menipisnya under cooling kebawah suhu eutektik. Pada praktiknya ini berarti tidak akan terjadi pembekuan putih (ledeburit).

Dari analisa pembekuan besi cor hipoeutektik dapat dijelaskan, bahwa pada awal pembekuan akan terbentuk butiran kristal austenit primer dengan kandungan C maksimumnya hanya 2.06%, mengakibatkan konsentrasi unsur C dalam sisa cairan naik serta akhirnya konsentrasi eutektik ( $CE = 4.3\%$ ) tercapai, dimana solidifikasi eutektik seharusnya terjadi secara stabil (grafit + austenite). Namun, akibat perbedaan komposisi, ketebalan, laju pendinginan, suhu cor dan lain hal, berbagai kondisi teknis pada proses pengecoran logam tersebut tidak mampu menjamin pembekuan stabil tersebut, sehingga besi cor akan mengalami pendinginan hingga dibawah suhu eutektik yang seharusnya (under cooling) sebelum membeku. Undercooling yang kecil akan membentuk grafit tipe A, yaitu grafit lamelar acak, secara uniform. Namun bila undercooling ini semakin besar, grafit akan terbentuk secara mengelompok hingga menjadi grafit tipe B, bahkan menjadi grafit tipe D dan E yang halus dan tersebar diantara lengan- lengan dendrite (interdendritik) atau tidak terbentuk sama sekali sehingga menghasilkan karbida yang keras yang disebut dengan struktur ledeburit.



Gambar 2.16 Tipe grafit vs Undercooling

(Inokulasi pada Besi Cor, 2015)

Peran inokulasi adalah untuk menghasilkan inti-inti pembekuan grafit yang akan menyejajarkan solidifikasi eutektik sehingga terjadi undercooling yang kecil saja dan menghasilkan grafit tipe A, atau pada besi cor nodular berupa grafit bulat kecil-kecil dalam jumlah banyak. Selain itu, dengan inokulasi juga dapat dilakukan pengecoran produk dengan ketebalan berbeda-beda hanya dengan satu komposisi dasar cairan saja (base material) maupun membuat besi cor dengan CE rendah sehingga menghasilkan kekuatan tarik tinggi namun memiliki kekerasan relative rendah sehingga memiliki sifat mampu mesin (*machinability*) tinggi.

Pada proses peleburan dengan tanur kupola, efek inokulasi didapat dari terbentuknya senyawa MnS. Banyaknya kandungan S (biasanya dibatasi sampai maksimum 0.15%) yang berasal dari bahan bakar (kokas) hanya memerlukan penambahan unsur Mn untuk menghasilkan inti yang cukup banyak. Hubungan S dengan Mn adalah sebagai berikut:

$$\%Mn = \%S \times 1.7 + 0.3\%$$

Senyawa MnS ini akan terbentuk segera pada awal solidifikasi sehingga dapat berperan sebagai inti pembentukan grafit. Tanpa Mn, unsur S akan membentuk senyawa FeS dipenghujung solidifikasi, sehingga justru akan menghambat pembentukan grafit serta menaikkan undercooling sampai dengan terjadi pembekuan putih. Bila kandungan S kurang dari 0.03% (umumnya pada proses peleburan dengan tanur induksi), jumlah senyawa MnS menjadi terlalu sedikit untuk berperan sebagai inti. Tanpa proses inokulasi tambahan, pembekuan akan menghasilkan grafit tipe D atau bahkan tidak terbentuk. Kelebihan Mn (karena S kurang) akan membentuk senyawa MnSiO<sub>2</sub> (Mangansilikat) yang berupa terak cair yang berpotensi menjadi cacat *slag inclusion*.

Efek yang dihasilkan oleh inokulasi terhadap besi cor nodular antara lain:

1. Mengurangi (menghilangkan) efek chill (pembekuan putih) dan mottle (campuran ledeburit/perlit).

2. Meningkatkan keuletan (grafit bulat kecil-kecil namun banyak).
3. Mencapai kekuatan maksimum untuk struktur yang dikehendaki.
4. Mencegah retak ataupun patah saat pemotongan saluran (knocking)

## 2. Metode Inokulasi

Inokulasi merupakan bagian penting pada pembuatan besi cor berkualitas, khususnya besi cor kelabu dengan kekuatan tarik tinggi dan juga besi cor nodular. Pengendalian maupun kecermatan/ ketepatan proses menjadi suatu keharusan untuk mencapai hasil yang memuaskan. Prinsipnya adalah, bahan inokulasi (inokulan) harus dapat tercampur secara homogen dengan cairan. Sehingga dengan demikian inokulan harus dapat ikut bersama dengan curahan cairan kedalam ladle baik pada saat pada saat *taping (furnace to ladle)* atau pada saat pemindahan dari ladle utama ke ladle penuang (*ladle to ladle*). Bahkan pada perkembangan selanjutnya inokulasi dilakukan pada penghujung proses yaitu pada saat penuangan (*ladle to mold*). Untuk kasus dimana inokulasi kedalam ladle tidak dapat dilakukan bersama dengan curahan, maka inokulasi lanjut (*late ataupun post inoculation*) menjadi pilihan. Inokulan ditaburkan ke permukaan cairan dan kemudian diaduk hingga merata kedalam cairan. Proses inokulasi cara ini menuntut permukaan cairan yang bersih (bebas) dari terak, suhu yang cukup untuk melarutkan bahan inokulan serta umumnya dilakukan sebagai inokulasi tambahan apabila efek yang dihasilkan dari inokulasi sebelumnya telah berkurang (*fading effect*).

Penurunan efek inokulasi akan mengakibatkan:

1. *Under cooling* membesar sehingga meningkatkan kecenderungan terjadinya pembekuan putih.
2. Mengurangi jumlah pertumbuhan sel eutektik sehingga mengakibatkan grafit terbentuk tidak uniform serta menurunkan kekuatan mekanik.
3. Sedikitnya sel eutektik juga mengakibatkan sedikitnya jumlah

grafit yang terjadi sehingga ukuran masing-masing grafit menjadi besar.

Mengingat masing-masing bahan inoculan maupun kondisi cairan mengakibatkan laju penurunan efek yang berbeda-beda, maka dianjurkan untuk melakukan pengujian awal tentang efek ini pada suatu proses peleburan dengan menggunakan bahan inoculan tertentu. Penurunan efek inoculasi juga dapat dikoreksi dengan melakukan inoculasi susulan (*post inoculation*) kedalam *pouring ladle*, pada saat sisa cairan dalam *ladle* masih banyak serta suhu cukup sementara efek dirasakan sudah berkurang terlalu banyak.

