

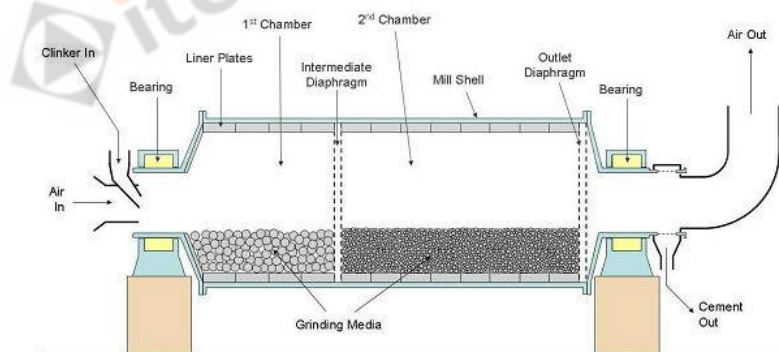
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Liner Ball Mill*

Liner ball mill adalah salah satu komponen yang terdapat pada mesin *ball mill* dimana proses pembuatan semen dilakukan. Dalam *ball mill* *liner* terdapat di lapisan permukaan bagian dalam mesin *ball mill*, *liner* berfungsi untuk melindungi mesin *cement mill* dari benturan yang disebabkan oleh *ball grinding*.

Bahan yang memenuhi syarat dari *liner* adalah logam yang mengandung Fe, yaitu besi/baja. Besi/baja memiliki sifat yang bermacam – macam, 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 2.1 Mesin *Ball Mill*

Sumber : <http://www.greatwallcorporation.com/product/ball-mill/cement-ball-mill.html>

2.2 *Ball Mill*

Alat ini berfungsi sebagai penggiling campuran klinker dengan gypsum untuk mendapatkan semen. *Ball Mill* terbuat dari plat baja berbentuk

silinder horizontal. Didalamnya dilapisi linner yang terbuat dari baja tuang yang dipasang menempel pada dinding. Tujuan pemasangan linner adalah untuk melindungi shell dari bentura bola penggiling. Alat tersebut terdiri dari 2 compartemen, dimana masing-masing compartemen memiliki ukuran bola penggiling yang berbeda yaitu:

- a. Compartmen I sepanjang 2,5 m berisi bola-bola baja berdiameter 40-70 mm, berfungsi sebagai penggiling material kasar menjadi setengah halus.
- b. Compartment II sepanjang 10,5 m berisi bola-bola baja berdiameter 20-40 mm, berfungsi sebagai penggiling material setengah halus menjadi halus. Umpan yang berupa klinker dan gypsum dalam komposisi tertentu masuk kedalam Cement mill melalui hopper. Karena putaran cement mill maka material dan bola-bola baja berputar melintasi dinding mill. Material mengalami penghancuran dan penghalusan karena adanya tumbukan dan gesekan antara bolabola baja (grinding ball) dan material. Perputaran ini akan mempertinggi efek grinding. Diantara compartmen I dan compartment II dipisahkan oleh sekat tipe diafragma double wall. Material setelah di hancurkan dalam compartment I, kemudian masuk ke compartment II melalui celah diafragma. material keluar melalui discharge end, karena putaran cement mill dan dorongan fresh mill. Produk tersebut kemudian dibawa ke air separator denga bantuan bucker elevator.



Gambar 2.2 Mesin *Ball Mill*

Sumber : (<http://www.indiacementreview.com>)

2.3 Besi Cor

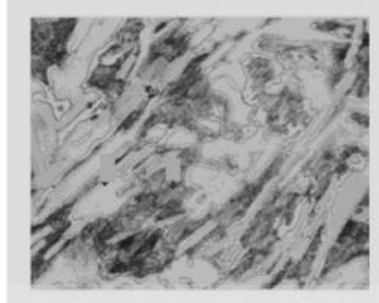
Besi cor merupakan paduan antara unsur besi yang mengandung *carbon* (C), *silica* (Si), mangan (Mg), phosphor (P), dan sulfur (S). Pada besi cor karbon biasanya antara 2% sampai 6,67%, sedang pada baja kandungan karbon hanya mencapai 2%. Semakin tinggi kadar karbon yang ada pada besi cor akan mengakibatkan 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. (Wahyu Darmadi, 2015)

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. (Sumber : Wahyu Darmadi, 2015)

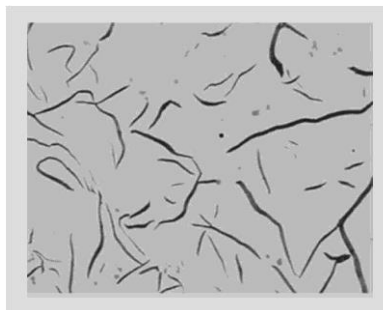


Gambar 2.3 Struktur Mikro Besi Cor Putih

Sumber : Wahyu Darmadi, 2015

2. Besi Cor Kelabu

Besi cor kelabu memiliki kadar silikon 2% dengan membentuk grafit dengan mudah sehingga Fe_3C 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. (Sumber : Wahyu Darmadi, 2015)

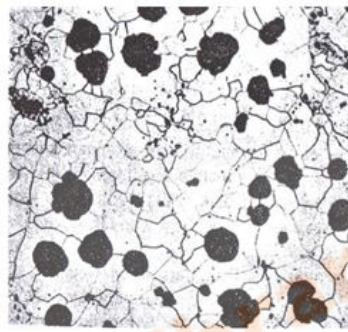


Gambar 2.4 Struktur Mikro Besi Cor Kelabu

Sumber : Wahyu Darmadi, 2015

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. (Sumber : Wahyu Darmadi, 2015)

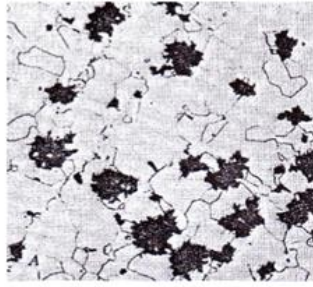


Gambar 2.5 Struktur Mikro Besi Cor Nodular

Sumber : Wahyu Darmadi, 2015

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 Fe₃C 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. (Sumber : Wahyu Darmadi, 2015)



Gambar 2.6 Struktur Mikro Besi Cor Malleable

Sumber : Wahyu Darmadi, 2015

2.4 Pengaruh Kandungan Kimia Besi Cor

- Pengaruh Tembaga (Cu)

Tembaga adalah logam yang berwarna kemerahan dengan berat jenis $8,65 \text{ gr/cm}^3$ yang mempunyai titik lebur $1070^\circ\text{C} - 1193^\circ\text{C}$ dan memiliki kekuatan tarik $200 - 400 \text{ N/mm}^2$. Tembaga sering digunakan dalam industri karena 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)

Kadar karbon tergantung pada jenis besi kasar, besi bekas dan 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 Khromium (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. (Sumber : <https://www.slideshare.net/muhamadawal/jenis-besi-cor-dan-kandungannya>)

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 2.7 Distribusi Grafit

Sumber : <https://hapli.wordpress.com/forum-ferro/besi-cor/> Diambil 10 Oktober 2019, 18:47 WIB

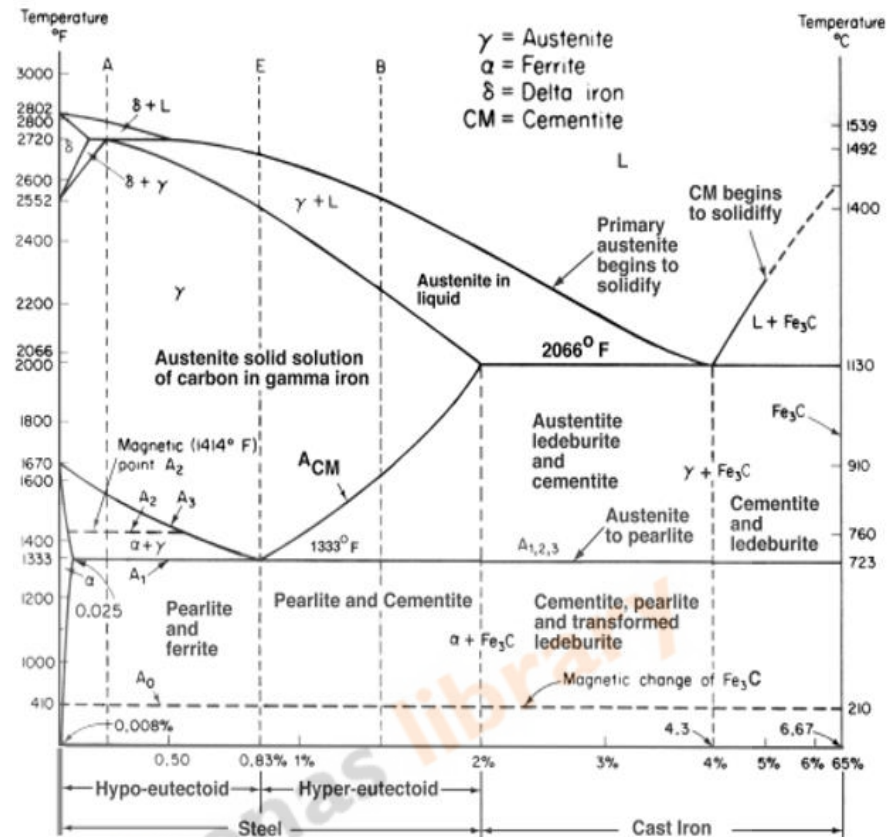
- **Distribusi grafit A** dimiliki oleh besi cor kelas tinggi dengan matrik perlit.
- **Distribusi grafit B** kecenderungan terjadi pada coran tipis, untuk kandungan karbon atau silikon relatif rendah. Besi cor yang memerlukan kekuatan tarik 25-30 kg/mm² diperbolehkan memiliki distribusi grafit B sebanyak 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. (Sumber : <https://www.slideshare.net/muhamadawal/jenis-besi-cor-dan-kandungannya>)

2.6 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 (Tata Surdia dan Shinroku Saito, 1985). Sementit mempunyai kadar C = 6,67 %.

1. Diagram Keseimbangan Fasa Fe-C

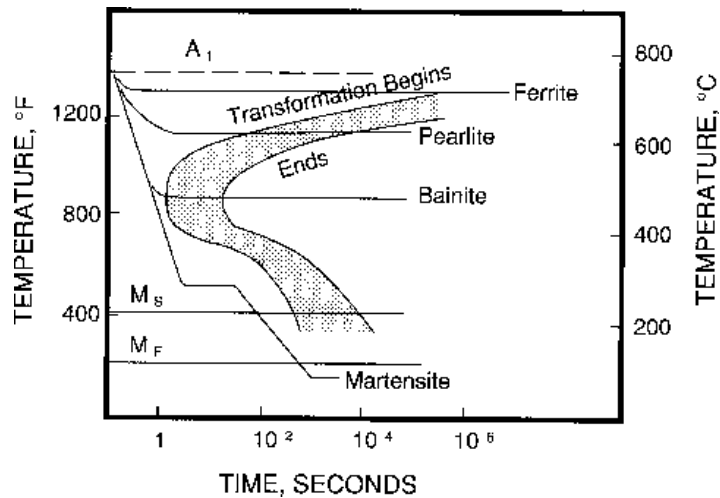


Gambar 2.8 Diagram Keseimbangan Fasa Fe-C

Sumber : (Sinha, 2003)

2. Diagram TTT dan CCT

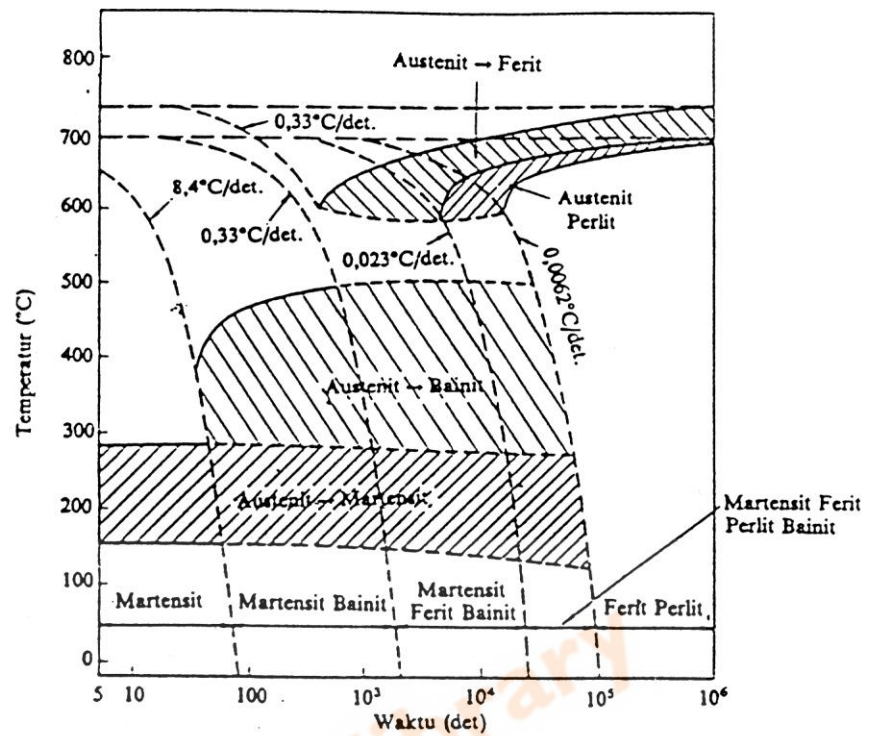
Untuk menentukan laju reaksi perubahan fasa yang terjadi dapat diperoleh dari diagram TTT (Time Temperature Transformation). Diagram TTT untuk besi cor kelabu di tunjukkan oleh gambar 2.14



Gambar 2.9 Diagram TTT untuk Besi Cor Kelabu

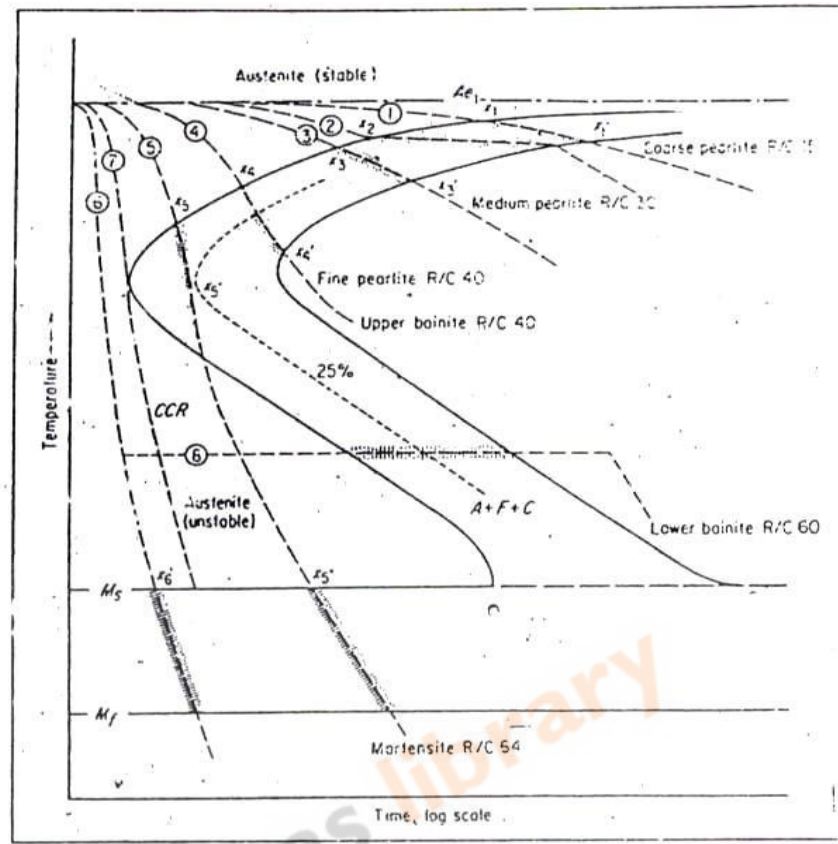
Dari gambar diatas menunjukkan bentuk hidung (nose) sebagai batasan waktu minimum dimana sebelum waktu tersebut bertransformasi austenit ke perlit tidak akan terjadi. Posisi hidung dari diagram TTT dapat bergeser menurut kadar karbon. Posisi hidung bergeser makin kekanan yang berarti baja karbon itu 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 2.10 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 2.11 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 daripada kurva 7 yang merupakan laju pendinginan kritis (critical cooling rate) yang nantinya akan tetap terbentuk fase austenite (unstable). Sedangkan pada kurva 6 lebih cepat daripada kurva 7, sehingga terbentuk struktur martensite yang keras , tetapi bersifat rapuh karena tegangan dalam yang besar.

Fase-fase yang terjadi pada baja antara lain :

- **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. (Sumber : Material Teknik, 2016)

- **Austenite**

Fasa 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. (**Sumber** : Material Teknik, 2016)

- **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. (**Sumber** : Material Teknik, 2016)

- **Pearlite**

Pearlite adalah suatu campuran lamellar dari ferrite dan cementite. Konstituen ini terbentuk dari dekomposisi Austenite melalui reaksi eutektoid pada keadaan setimbang, di mana lapisan ferrite dan cementite terbentuk secara bergantian untuk menjaga keadaan kesetimbangan komposisi eutektoid. Pearlite memiliki struktur yang lebih keras daripada ferrite, yang

terutama disebabkan oleh adanya fase cementite atau carbide dalam bentuk lamel-lamel. (**Sumber** : Material Teknik, 2016)

- **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. (**Sumber** : Material Teknik, 2016)

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

Tabel 2.1 Fasa yang ada pada Baja (Tata Surdia dan Shinroku Saito, 1985)

	Fasa dan Simbol	Struktur	Penjelasan
Menurut Kristal	Austenit (γ)	FCC	Paramagnetik dan stabil pada temperatur tinggi.
	Ferit (α)	BCC	Stabil pada temperatur rendah, kelarutan padat terbatas, dapat berada bersama Fe_3C (sementit) atau lainnya
	Bainit (α')	BCC	Austenit metastabil didinginkan dengan laju pendingin cepat tertentu. Terjadi hanya presipitasi Fe_3C , unsur paduan lainnya tetap larut.
	Martensit (α')	BCT	Fasa metastabil terbentuk dengan media pendingin cepat, semua unsur paduan masih larut Dalam keadaan padat.
Menurut keadaan	Perlit		Lapisan ferit dan Fe_3C .
	Widmanstaetten		α dan γ 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.

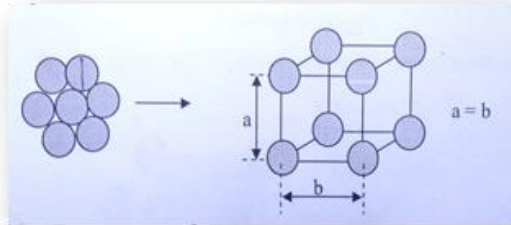
2.7 Sel Satuan

Sistem slip menentukan karakteristik sifat mekanik dari logam. Semakin banyak sistem slip logam tersebut, maka semakin mudah atom-atom untuk bergerak, semakin muda atom bergerak maka logam tersebut semakin lunak, dan sebaliknya semakin sulit atom bergerak atau semakin sedikit jumlah bidang slip suatu logam, maka logam tersebut semakin keras.

Sel satuan tidak dapat berubah dengan diberinya deformasi. Sel satuan dapat berubah apabila fasa dari logam tersebut berubah. (Sumber : Material Teknik, 2016)

Contoh sel satuan :

a. Kubus Sederhana (*Simple Cubic*)



Gambar 2.12 Kubus Sederhana (*Simple Cubic*)

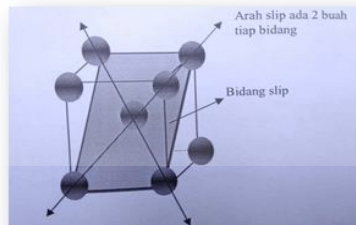
Sumber : Buku Material Teknik, 2016

Memiliki bilangan kordinasi = 6 dimana satu atom dikelilingi oleh 6 atom yang sama, ini tidak logam

Jumlah atom persatuan sel satuan :

$\frac{1}{8} \times 8 = 1 \text{ atom}$, ini berguna untuk menentukan masa jenis atom teoritik.

b. *Body Center Cubic* (BCC)



Gambar 2.13 Sel Satuan *Body Center Cubic* (BCC)

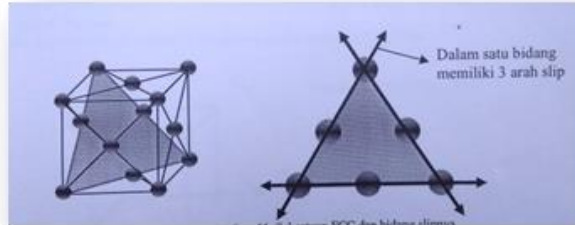
Sumber : Buku Material Teknik, 2016

Jumlah atom persel satuan

$\frac{1}{8} \times 8 = 1 \text{ atom} + 1 \text{ atom} = 2 \text{ atom}$, memiliki bidang geser (bidang slip)
= 6

Bidang slip adalah bidang yang memiliki jumlah atom terbanyak dan terpadat.

c. *Face Center Cubic (FCC)*



Gambar 2.14 Sel Satuan *Face Canter Cubic (FCC)*

Sumber : Buku Material Teknik, 2016

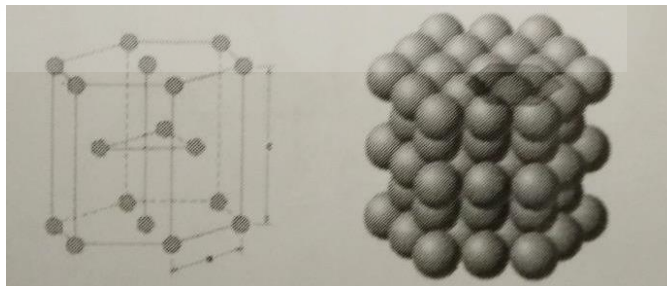
Jumlah atom per sel satuan

$$\frac{1}{8} \times 8 = 1 \text{ atom} + \left(\frac{1}{2}\right) \times 6 \text{ atom} = 4 \text{ atom}$$

Memiliki bidang geser (bidang slip) = 8

Bidang slip adalah bidang yang memiliki jumlah atom terbanyak dan terpadat. Jumlah arah slip dari FCC adalah 3 setiap bidang slipnya. Sehingga sistem slip dari FCC adalah $(3 \times 8) = 24$ buah

d. *Hexagonal Close Packed (HCP)*



Gambar 2.15 Sel Satuan *Hexagonal Close Packed (HCP)*

Sumber : Buku Material Teknik, 2016

Mempunyai struktur yang rumit tapi tetap di sederhanakan. Pada gambar dapat dilihat susunan atomnya sangat rumit dan di tengahnya terdapat 3 buah atom. Jumlah atom tiap sel satuannya adalah 8 atom yaitu :

- Atom sudut terdiri dari $\frac{1}{3}$ atom dikali 12 = 4 atom
- Atom di pusat bidang $\frac{1}{2}$ dikali 2 = 1 atom
- Atom yang berada di dalam sel 3 atom

2.8 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). (Sumber : Material Teknik, 2016)

2.9 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 indenter 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 brinnell :

$$\text{BHN} = \frac{P}{A} \text{ (kg/mm}^2\text{)} \dots\dots\dots(1)$$

b. Metoda Vicker

Prinsip kerja sama dengan brinnell, tetapi perbedaan dari bahan dan bentuk dari indenter. Pengujian vicker

menggunakan indenter piramida intan, dengan memperhitungkan sudut maka kekerasan vickers dapat dihitung dengan persamaan :

$$\text{VHN} = 1,854 \frac{P}{d^2} \text{ dengan harga } d = \frac{d_1+d_2}{2} \dots\dots\dots(2)$$

Pembebanan pada pengujian vicker :

- Beban makro : 1kg – 30kg, biasa digunakan untuk mengukur kekerasan material yang memiliki permukaan yang kasar atau spesimen yang besar.
- Beban mikro : < 1kg (kecil dari 1000g). Biasa digunakan untuk mengukur kekerasan fasa – fasa yang terdapat pada logam, sehingga mengukur diagonal jejak dengan menggunakan mikroskop.

c. Metoda Meyer

Prinsip kerja hampir sama dengan metoda brinnell, hanya berbeda dalam pengukuran luas jejak penekanan dimana luasnya adalah luas permukaan jejak. Jejak hasil penekanan dilihat dengan mikroskop ukur kemudian dirata – ratakan

$$d = \frac{d_1+d_2}{2}, \text{ maka } \text{MHN} = \frac{4p}{\pi d^2} \dots\dots\dots(3)$$

d. Knoop

Prinsip kerja hampir sama dengan vicker hanya luas penekanan yang berbeda dan alas penekanan berbentuk belah ketupat.

$$\text{KHN} = 1,5 \frac{P}{d^2} \dots\dots\dots(4)$$

e. 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 bende kerja lebih dalam. (**Sumber** : Material Teknik, 2016)

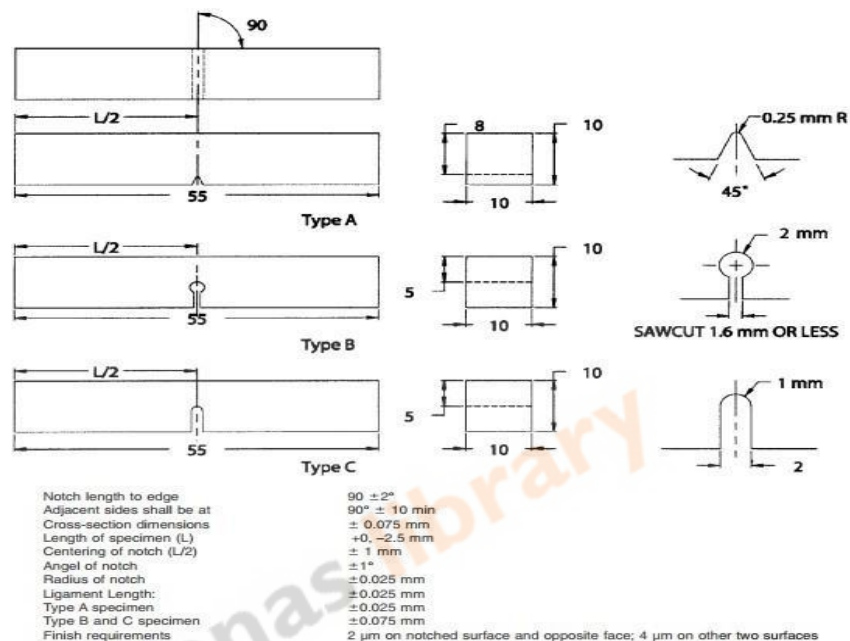
2.10 Uji Impak

Tujuan pengujian impak :

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 impak (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.

$$\text{Persamaan harga dampak : HI} = \frac{E}{A} \dots\dots\dots(5)$$



Gambar 2.16 Dimensi Spesimen Serdasarkan Standar ASTM E-23

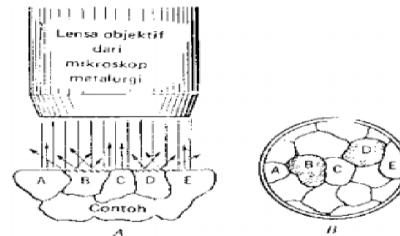
(Sumber : Material Teknik, 2016)

2.11 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 2.17 Pemeriksaan benda uji dengan mikroskop metalurgi

Sumber : Material Teknik 2016

- 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 dietsa 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. (**Sumber :** Material Teknik, 2016)

2.12 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. Perlakuan panas pada besi cor putih kromium paduan tinggi umumnya dilakukan untuk presipitasi karbida sekunder, yang juga didukung oleh destabilisasi austenit yang kemudian bertransformasi menjadi martensit. (Sumber : Hera Setiawan, 2008)

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. Prosesnya adalah memanaskan kembali berkisar antara suhu 150°C - 650°C dan didinginkan secara perlahan – lahan tergantung sifat akhir baja tersebut.

3. Perlakuan Sub-kritis

Perlakuan sub-kritis merupakan tahapan perlakuan panas yang dilakukan untuk mendapatkan struktur perlit diantara matriks austenit. Sub-kritis ini dilakukan sedikit di bawah temperatur kritis A1 yaitu pada suhu 723°C. Hal ini dilakukan agar austenit tidak menjadi stabil saat proses destabilisasi sehingga austenit dapat bertransformasi menjadi martensit. Selain itu perlakuan sub-kritis juga berfungsi untuk mentransformasi austenit sisa yang didapat dari material yang belum diberikan perlakuan panas.

4. Austenisasi

Austenisasi bertujuan untuk mendapatkan struktur austenit yang homogen. Keseimbangan kadar karbon austenit akan bertambah dengan naiknya suhu austenisasi, hal ini mempengaruhi karakteristik isothermal.

5. Pendinginan Cepat

Pendinginan Cepat adalah perlakuan panas terhadap logam seperti baja dan besi paduan dengan sasaran meningkatkan kekerasan alami logam tersebut. Perlakuan panas menuntut pemanasan benda kerja menuju suhu pengerasan dan pendinginan cepat dengan kecepatan

pendinginan kritis.

2.13 Proses Pembuatan *Liner Ballmill* dengan Metode Pengecoran

Logam Proses pembuatan *Liner Ballmill*, 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, dimana keduanya terbagi menjadi dua bagian (parting line),
2. Pembuatan cetakan
Pembuatan menggunakan pasir cetak (sand mold), dimana pasir kuarsa (96% SiO₂) 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.

2.14 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 O₂ 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 2.18 (a) Tanpa Inokulasi (b) dengan Inokulasi

Sumber : 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 pemuaiannya grafit sehingga

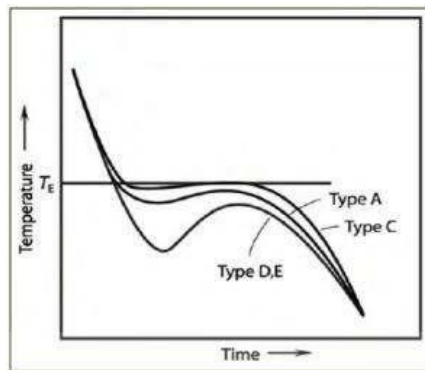
meningkatkan potensi shrinkage. Walaupun karbida ledeburit dapat diuraikan menjadi grafit melalui proses heat treatment, namun hal ini hanya akan meningkatkan biaya proses.

- 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 undercooling 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 2.19 Tipe Grafit vs Undercooling

Sumber : Jurnal Inokulasi pada Besi Cor, 2015

Peran inokulasi adalah untuk menghasilkan inti-inti pembekuan grafit yang akan menyegerakan 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 ketermesinan (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:

$$\%Mn = \%S \times 1.7 + 0.3\% \dots\dots\dots (6)$$

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 MnSiO₂ (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 motlle (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)
- 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 tapping (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). Gambar 5 merupakan bagan dari berbagai proses inokulasi menurut J.N. Harvey dan G.A. Noble pada presentasinya di 55th Indian Foundry Congress 2007.

Menurut Harvey dan Noble, inokulasi dapat dilakukan di atau kedalam transfer ladle, pouring ladle, bersama dengan curahan cairan saat pouring atau diletakkan didalam mold (inmold inoculation). Untuk inokulasi didalam ladle digunakan bahan inokulan dengan ukuran partikel 0.5-15 mm sebanyak 0.3-1% tergantung dari suhu tapping maupun holding time setelahnya. Sedangkan bila inokulasi dilakukan bersama curahan cairan dibutuhkan bahan inokulan berukuran partikel 0.2-0.7 mm sebanyak 0.05-0.2%. Untuk inmold inoculation biasanya digunakan bahan inokulan berbentuk briket yang ditanam dalam kantung inokulasi pada saluran terak (runner).

- **Penurunan Efek Inokulasi (*Fading of Inoculation*)**

Inokulan memiliki efek maksimum segera sesaat setelah proses inokulasi berlangsung, kemudian efek tersebut akan menurun

terus sampai akhirnya hilang sama sekali. Laju dari penurunan efek ini tergantung dari komposisi bahan inokulan yang digunakan maupun kondisi cairan yang diinokulasi (suhu dan komposisi). Penurunan efek inokulasi akan mengakibatkan:

1. Undercooling 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 inokulan 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 inokulan tertentu. Penurunan efek inokulasi juga dapat dikoreksi dengan melakukan inokulasi susulan (*post inoculation*) kedalam *pouring ladle*, pada saat sisa cairan dalam *ladle* masih banyak serta suhu cukup sementara efek dirasakan sudah berkurang terlalu banyak.

- Cacat Akibat Inokulasi

Pemberlakuan proses inokulasi pada pembuatan besi cor baik lamelar maupun nodular perlu dilakukan dengan berbagai pertimbangan dan perhitungan yang cermat, agar diperoleh hasil yang memuaskan tanpa diikuti dengan dampak negative berupa cacat coran.

Beberapa cacat yang mungkin muncul akibat dari proses inokulasi antara lain:

1. Penurunan grade

Proses inokulasi, khususnya dengan menggunakan inokulan berbasis ferrosilicon (FeSi) akan memberikan kandungan Si yang cukup besar. Kenaikan kandungan Si ini dapat mengakibatkan komposisi bahan tidak sesuai dengan tebal dinding produk, mengingat grade besi cor baik lamelar maupun nodular sangat ditentukan oleh kesesuaian komposisi (C dan Si) dengan ketebalan dinding produk dimana grade tersebut harus tercapai.

2. Shrinkage

Banyaknya jumlah sel eutektik hasil proses inokulasi mengakibatkan jumlah grafit yang terbentuk juga semakin banyak. Sebagaimana diketahui, pertumbuhan grafit pada pembekuan besi cor akan mengakibatkan terjadinya pemuaian. Banyaknya jumlah grafit yang tumbuh akan mengakibatkan pemuaian yang dapat lebih besar dari susut kristal logamnya sehingga justru mengakibatkan pemuaian yang memberikan tekanan yang besar kesemua arah. Cetakan greensand, khususnya bila memiliki pemadatan kurang baik akan terdesak dan mengakibatkan modul benda menjadi lebih besar serta menuntut feeding yang lebih banyak. Dengan demikian rancangan feeding system perlu untuk ditinjau kembali.

3. Gas / Slag Inklusi

Setiap pembubuhan bahan paduan kedalam cairan berisiko terbentuknya gas dan atau slag sebagai produk samping dari reaksinya dengan cairan. Jumlah gas/slag yang terbentuk tergantung dari kualitas bahan inokulan, sedangkan waktu pembentukannya tergantung dari suhu cairan, jenis bahan inokulan dan komposisi cairan. Pada prinsipnya, gas/slag terbentuk perlu mendapatkan waktu untuk menyelesaikan prosesnya serta naik kepermukaan cairan sehingga mudah untuk dikendalikan dan tidak

terbawa aliran cairan masuk kedalam cavity saat penuangan.

- Pengaruh Silikon (Si) pada Proses Pengecoran

Pada proses peleburan baja, Silikon (Si) biasanya berasal dari lining tanur, terutama tanur asam dan terak sebagai hasil reduksi SiO_2 yang terkandung didalamnya. Namun demikian Si dalam bentuk Ferosilikon (FeSi) digunakan pula sebagai media deoksidasi dan reduksi besi oksida (FeO) kembali menjadi Fe dan sisanya terak SiO_2 .

Kandungan Si sebesar 0,2 – 0,5% berguna sebagai unsur paduan yang mengakibatkan peleburan baja menjadi tenang (tidak bergejolak). Sedangkan kandungan Si = 0,1% akan menyebabkan proses peleburan baja masih cukup bergejolak. Proses peleburan baja akan sangat bergejolak bila kandungan Si dibawah 0,02%, kecuali kedalamnya dipadukan unsur lain yang juga berfungsi sebagai deoksidator seperti Aluminium ataupun Titanium.

Kemampuan besi α (ferit) dalam melarutkan Si sangat tinggi dan pada temperatur kamar masih sebesar 14%. Oleh karena itulah pada struktur baja karbon polos dengan kandungan Si dibawah 0,5% tidak ditemukan fasa-fasa selain yang terkandung dalam baja pada umumnya. Si dalam jumlah kecil akan larut sempurna didalam kristal campuran α -silikon (silikoferit).

Pada baja karbon sebagian dari Si juga akan membentuk karbida (silikonkarbid), sehingga secara umum bila dibandingkan dengan unsur karbon, Si hampir tidak memiliki pengaruh terhadap perubahan struktur baja. Si akan menurunkan titik lebur baja secara drastis dengan temperatur interfal liquidus – solidus sangat kecil sehingga segregasi Si tidak sempat terjadi. Namun demikian pada kandungan 2%, Si akan menyebabkan terjadinya zona peralihan kristal (transkristalisationszona) pada coran masif.