

2. TEORI DASAR

2.1 Besi Cor Nodular

Besi cor nodular juga dikenal dengan *ductile iron*, *spheroidal graphite iron* (SG iron), atau *spherulitic iron*. Besi tuang ini grafitnya berbentuk bola-bola kecil (*spheroid*). Karena grafitnya yang berbentuk *spheroid* yang padat (compact) menyebabkan kekuatan dan ketangguhannya lebih tinggi dari pada besi tuang dengan grafit berbentuk *flake* (besi tuang kelabu).

Berbeda dengan *malleable cast iron* (besi tuang mampu tempa), grafit berbentuk *spheroid* ini diperoleh langsung dari pembekuan atau hasil *as cast*, bukan dari suatu proses laku panas. Selain itu *spheroid* ini lebih bulat dan konipak dari pada temper karbon pada malleable cast iron. Kandungan kadar karbon pada besi tuang ini sama dengan besi tuang kelabu. Struktur matrik tergantung pada komposisi dan laju pendinginan. Besi cor nodular dengan matrik ferit dan perit ini memiliki keuletan, ketangguhan dan machinability yang baik.

2.1.1 Base Material

Komposisi kimia dasar material besi cor nodular tanpa paduan adalah sebagai berikut:

- Karbon (C) : 3,5 % - 3,9 %
- Silikon (Si) : 2,3 % - 2,7 %
- Mangan (Mn) : 0,25 % - 0,31 %
- Fosfor (P) : 0,05 % - 0,8 %
- Sulphur(S) : 0,01%-0,03%
- Nikel(Ni) : 0,10%-2,0%
- Molybdenum (Mo) : 0,03%-0,25%

Karbon dapat meningkatkan kekuatan tarik tetapi juga mempunyai efek yang kecil terhadap kekerasan dan elongation. Sedangkan untuk pembulatan grafit dipakai Mg, Ca, Ce dan paduan - paduannya. Terutama Mg dan paduan Mg adalah bahan tuang paling banyak digunakan, mengingat kemampuannya yang besar dalam pembentukan grafit bulat dan pengurangan belerang. [1]

2.1.2 Proses Pembuatan besi Cor Nodular

Proses peleburan besi cor nodular hampir sama dengan proses peleburan besi cor kelabu, namun demikian proses peleburan besi cor nodular diperlukan pengurangan unsur-unsur penting dalam proses pembulatan grafit. Oleh karena itu faktor yang penting dari proses ini adalah pemilihan bahan muatan dan melakukan pengurangan belerang. Adapun beberapa tahap dalam pembuatan besi cor nodular, antara lain :

- Pencairan

Untuk proses pencairan besi cor nodular hampir semua alat pencairan (melter) dapat digunakan untuk membuat besi cor nodular, asalkan karakteristiknya memenuhi kriteria pembuatan besi cor nodular. Adapun beberapa kriteria yang harus dipenuhi oleh alat pencairan untuk peleburan besi cor nodular, antara lain :

- o Pemanasan awal (*pre heating*)
- o Unit pendinginan
- o Furnace lining
- o Kapasitas pencairan dan charge material
- o Kontrol terhadap *slag*, besi cair, komposisi kimia serta metalurgi
- o Temperatur yang dicapai

Untuk temperatur pencairan pada besi cor nodular adalah antara 1400 °C-1500 °C.

- Desulfurisasi

Desulfurisasi adalah suatu proses yang diperlukan untuk mengurangi kadar belerang hingga mencapai dibawah 0,03 %, dengan tujuan supaya proses nodularisasi dapat berjalan dengan baik dan sesuai dengan yang diinginkan. Kadar belerang yang tinggi lebih dari 0.03 % akan mengganggu mekanisme pembulatan grafit karena sebagian unsur Mg (*nodulizer*) akan diikat oleh S membentuk MgS. Jadi kadar belerang yang tinggi akan memerlukan jumlah nodulizer yang lebih banyak. Untuk proses desulfurisasi pada umumnya digunakan kalsium Karbid(CaC₂). [2]

Nodularisasi

Nodularisasi adalah proses penambahan unsur (senyawa) tertentu pada besi cor cair agar terbentuk grafit bulat. Unsur-unsur yang dapat berfungsi sebagai *nodulizer* (pembulat grafit) antara lain: Magnesium (Mg), Calcium (Ca), Cerium (Ce), Barium (Ba), Sodium (Na). Diantara unsur-unsur tersebut yang paling banyak digunakan adalah magnesium (Mg) dan paduan magnesium, mengingat kemampuannya yang besar dalam membentuk grafit bulat dan pengurangan belerang. Mg murni mempunyai titik didih rendah dan tekanan uap tinggi, sehingga pencampuran yang langsung sangat berbahaya. Oleh karena itu biasanya dipadu dengan unsur lain. Paduan Fe-Si-Mg (5 - 20 % Mg) adalah bahan kalis untuk pembulatan grafit. Penambahan Mg langsung pada cairan mengakibatkan reaksi yang hebat dan memberikan hasil yang kurang.

Inokulasi

Inokulasi adalah penambahan logam lain atau paduan ke dalam cairan besi sebelum dituangkan. Jumlah penambahan ini kecil sekali, tidak cukup untuk mengubah komposisi kimia dari besi cair. Inokulasi menyebabkan distribusi grafit yang merata di dalam struktur logam dan memperbaiki sifat-sifat mekanis. Inokulasi meningkatkan ketahanan tarik dan menurunkan kekerasan. Inokulasi juga mencegah terjadinya cacat pada bagian tipis dari besi cor. Inokulan yang digunakan pada besi cor nodular dapat berupa kalsium silikat dengan 30 sampai 35 % Ca dan ferro silikon dengan 50 sampai 75 % Si.

Material Treatment

Material treatment adalah proses penambahan elemen-elemen utama yaitu C, Si, Mn, P, S atau proses penambahan elemen paduan minor yang meliputi Cr, Ni, Pb dan Ba. Pada umumnya *material treatment* dapat dilakukan pada proses manapun, baik bersama-sama proses pencairan, desulfurisasi, nodularisasi, maupun inokulasi. Tetapi *material treatment* lebih baik dilakukan setelah inokulasi, karena setelah proses inokulasi komposisi kimia besi cor sudah tidak berubah.

Sehingga elemen paduan utama dan elemen paduan minor yang akan ditambahkan jumlahnya dapat diatur dan disesuaikan dengan hasil akhir yang diinginkan.

- Penuangan

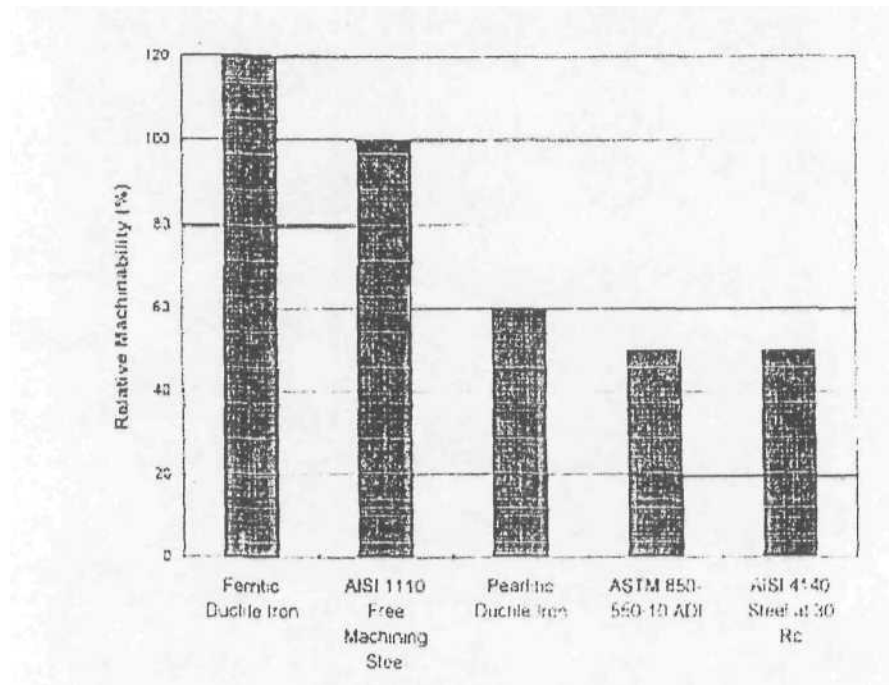
Proses akhir dari pembuatan besi cor nodular adalah dituangkannya cairan panas besi cor nodular kedalam cetakan. Cetakan ini biasanya terbuat dari bahan pasir ditambahkan bentonit, semen, serta air bila diperlukan. Pasir cetak yang diperlukan untuk pembuatan cetakan harus mempunyai sifat - sifat yang memenuhi persyaratan sebagai berikut [2]

- o Distribusi besar butir yang cocok
- o Permeabilitas yang cocok
- o Mempunyai sifat raampu bentuk sehingga mudah dalam pembuatan cetakan dengan kekuatan yang cocok.
- o Tahan panas terhadap temperatur logam yang dituang
- o Mampu dipakai lagi
- o Komposisi yang cocok

2.2 Sifat Mekanik

Sifat mekanik besi cor nodular feritik perlitik seperti *tensile strength*, kekerasan, *yield strength* dan elongasi sangat ditentukan oleh struktur mikronya. Dengan demikian perubahan struktur mikro akan menyebabkan perubahan sifat mekanik. Perubahan struktur mikro ini dapat dilakukan dengan beberapa cara antara lain, mengubah komposisi kimia pada proses pembuatan atau pengecoran dan proses perlakuan panas specimen.

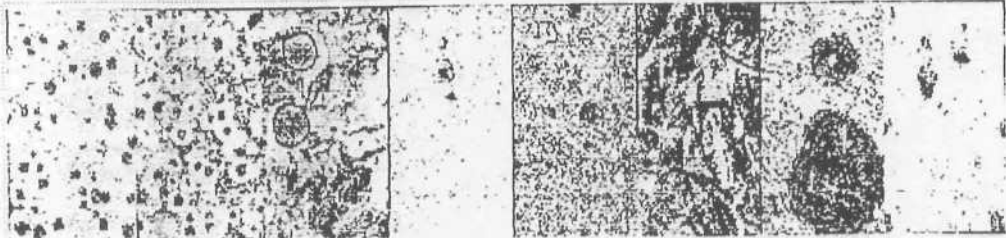
Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat mekanik besi cor nodular terkait dengan struktur mikronya adalah jenis matrik dan konfigurasi grafit. Untuk mengetahui perbedaan sifat mekanik dari beberapa logam dapat dilihat pada gambar 2.1.[1]



Gambar 2.1 Perbandingan Sifat Mampu Mesin [1]

2.2.1 Pengaruh Matrik Terhadap Sifat Mekanik

Sifat mekanik suatu bahan sangat ditentukan oleh matrik dari bahan itii sendiri. Matrik besi cor nodular terdiri dari ferit dan perlit atau gabungan dari ferit dan perlit. Ferit adalah besi murni untuk besi cor ulet yang mempunyai kekerasan dan kekuatan yang rendah tetapi memiliki keuletan yang tinggi, juga ketangguhan dan mampu mesin yang tinggi. Perlit adalah suatu campuran cementit JamelJar dalam matrik ferit. Kebalikan dari ferit, perlit memiliki kekuatan daii kekerasan tinggi tetapi keuletannya rendah. Sifat mekanik besi cor nodular dengan matrik ferit atau perlit dikendalikan oleh proses pengecoran dengan mengendalikan komposisi besi cor nodular, mempertimbangkan laju pendinginan tuangan, selain itu dapat juga dilakukan dengan cara proses laku panas, antara lain annealing dan austempering. Perbedaan matrik, stiuktur mikro dan kekuatan tarik dari proses tersebut dapat dilihat pada gambar 2.2 dan tabel 2.1. [1]

Matrix							
Ferritic Grade 5	Ferritic- pearlitic Grade 3	Pearlitic Grade 1	Martensitic (With retained austenite)	Tempered Martensitic	ADI Grade 150	ADI Grade 230	Austenitic
60,000 p.s.i. (414 mPa)	80,000 p.s.i. (552 mPa)	100,000 p.s.i. (690 mPa)	N.A.*	115,000 p.s.i. (793 mPa)	150,000 p.s.i. (1050 mPa)	230,000 p.s.i. (1600 mPa)	45,000 p.s.i. (310 mPa)
							
*Approximate ultimate tensile strength 87,000 p.s.i. (600 mPa) Hard, Brittle. (Note that the magnifications are different.)							

Gambar 2.2 Struktur Mikro Dan Kekuatan Tarik Besi Cor Nodular

Table 2.2. standart besi cor nodular sesuai ASTM A-536-77

Grade dan perlakuan panas	Tensile Strength minimum		Yield Strength minimum		Persen elongation min. 2'	Kekerasan Brinell Hardness*	Matrix struktur mikro*
	psi	MPa	psi	MPa			
60-40-18 (1)	60.000	414	40.000	276	18	149-187	ferit
65-45-12 (2)	65.000	448	45.000	310	12	170-207	ferit & perlit
80-55-06 (3)	80.000	552	55.000	379	6	197-255	perlit & ferit
100-70-03 (4)	100.000	690	70.000	483	3	217-269	perlit
120-90-02 (5)	120.000	828	90 .000	621	2	240-300	tempered martensite

Keterangan:

- (1) Hasil proses annealing
- (2) Hasil proses pengecoran sesuai standart
- (3) Hasil proses pengecoran dengan penambahan komposisi mangan yang cukup banyak
- (4) Hasil proses perlakuan panas nornializing
- (5) Setelah proses quenching dalam minyak dan dilakukan penemperan,dilakukan untuk rnemperoleh kekerasan yang tinggi

2.2.2 Kekuatan

Kekuatan adalah kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa menyebabkan bahan patah atau beban maksimum dalam bentuk tegangan yang diterima suatu material sebelum retak. Itu dapat dihitung dengan pembagian beban maksimum tersebut. Dalam hal ini adalah kekuatan elastik (*yield strength*) dan kekuatan tarik (*tensile strength*).

Kekuatan elastik menyatakan kemampuan untuk menerima beban/tegangan tanpa berakibat terjadinya deformasi plastik (perubahan bentuk yang permanen). Kekuatan elastik ini ditunjukkan oleh titik yield (besarnya tegangan yang mengakibatkan terjadinya yield). Untuk logam-logam yang ulet yang memperlihatkan terjadinya yield dengan jelas, tentu batas ini mudah ditentukan, tetapi untuk logam-logam getas dimana yield tidak tampak jelas atau sama sekali tak terlihat, maka yield dapat dicari dengan menggunakan *offset method*. Secara grafik yield strength dapat dicari dengan menarik garis sejajar dengan garis elastis dari titik regangan 0,2% atau 0,5 % hingga memotong kurva titik perpotongan ini menunjukkan yield.

Kekuatan tarik (*Tensile strength*) menunjukkan kemampuan untuk menerima beban atau tegangan tanpa menjadi rusak / putus. Ini dinyatakan dengan tegangan maksimum sebelum putus. Kekuatan tarik (Ultimate tensile strength-UTS):

$$UTS = \sigma_u = P_{max} / A_0 \dots\dots\dots (1)$$

UTS/kekuatan tarik ini sering dianggap sebagai data terpenting yang diperoleh dari hasil pengujian tarik, karena biasanya perhitungan-perhitungan kekuatan dihitung atas dasar kekuatan tarik ini. Data yang diperoleh dari mesin uji tarik biasanya dinyatakan dengan grafik beban - pertambahan panjang (grafik P - AL). Grafik ini masih belum banyak gunanya karena hanya menggambarkan kemampuan batang uji (bukan kemampuan bahan) untuk menerima beban gaya. Untuk dapat digunakan menggambarkan sifat bahan secara umum, maka grafik P - AL harus dijadikan grafik lain yaitu suatu diagram tegangan - regangan (stress - strain diagram), disebut juga suatu diagram σ - ϵ , kadang-kadang juga disebut Diagram Tarik. Pada saat batang uji menerima beban sebesar P kg maka batang

uji (yaitu panjang uji) akan bertambah panjang sebesar ΔL mm. Pada saat itu pada batang uji bekerja tegangan sebesar :

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana σ = Tegangan (kg/mm^2 , atau N/mm^2)

A_0 = luas penampang batang uji mula – mula (mm^2)

Juga pada saat itu pada batang uji mengalami regangan sebesar :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana ε = Regangan (mm/mm , atau %)

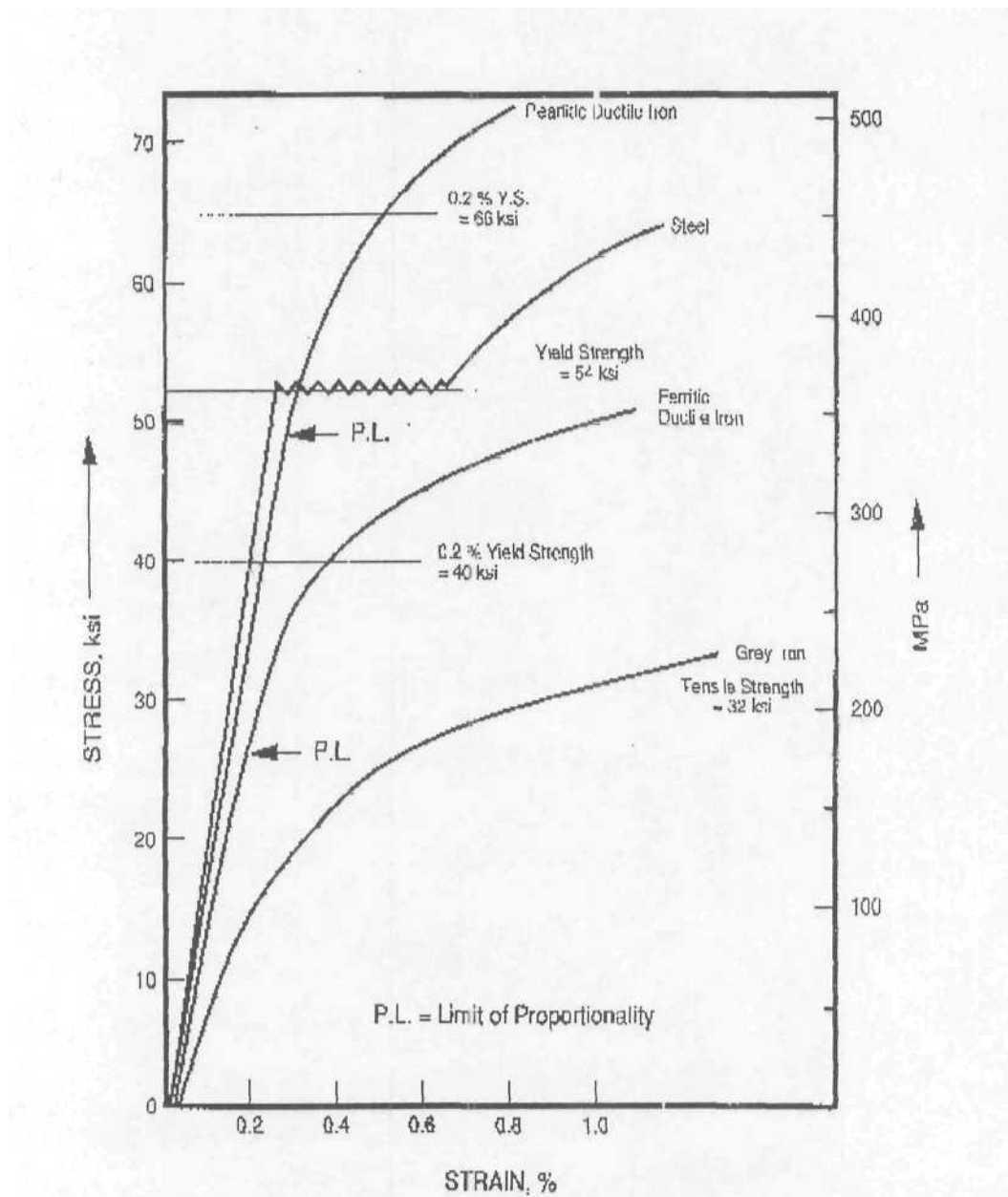
L_0 = Panjang batang uji mula – mula (mm)

L = Panjang batang uji saat menerima tegangan (mm)

Perbedaan grafik hasil uji tarik dari beberapa spesimen yang berbeda dapat dilihat pada gambar 2.3 [3]

2.2.3 Elongation

Elongation adalah peningkatan pertambahan panjang suatu material secara permanen. Hal ini dapat dikaitkan dengan keuletan suatu material jika pertambahan panjang yang terjadi secara permanen sangat besar maka dapat dikatakan material tersebut sangat ulet begitu juga sebaliknya maka dapat dikatakan getas. Material yang getas seperti besi tuang kelabu, pertambahannya sangat kecil bahkan dinyatakan gagal dalam uji tarik karena tidak ada pemanjangan. Tetapi besi cor nodular dapat memperlihatkan pertambahan panjang sampai 20 % hal ini dapat diperoleh dengan proses laku panas yang dapat menghasilkan kombinasi *elongation* dan kekuatan tarik yang baik. Besarnya nilai *elongation* yang terjadi dapat diketahui melalui besarnya nilai regangan plastis yang dihasilkan dari pengujian tarik terhadap spesimen. Besarnya regangan plastis yang terjadi ini dapat diketahui melalui diagram tegangan regangan. Selama regangan plastis dari diagram tegangan regangan ini juga dapat diketahui nilai *yield strength* dan *tensile strength* yang terjadi dari setiap proses yang dikenakan pada spesimen. Berikut diagram tegangan regangan yang terjadi pada bahan yang berbeda dapat dilihat pada gambar 2.3. [3]



Gambar 2.3 Perbandingan Yield Strength Besi Cor Kelabu, Baja Dan Besi cor Nodular Feritik, Perlitik Serta besi Cor Kelabu

2.2.4 Kekerasan

Kekerasan yang dimaksud adalah ketahanan terhadap indentasi. Kekerasan suatu material sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia material tersebut. Selain itu kekerasan suatu material dapat ditingkatkan dengan proses laku panas, antara lain austempering atau hardening dan tempering. Untuk mengetahui tingkat kekerasan suatu bahan dapat dilakukan dengan beberapa macara pengujian, yaitu

pengujian kekerasan Brinell, pengujian kekerasan Rockwell, pengujian kekerasan Vickers **dan mikrohardeness test**

Keakuratan pengujian kekerasan dengan indentasi dipengaruhi oleh faktor - faktor sebagai berikut:

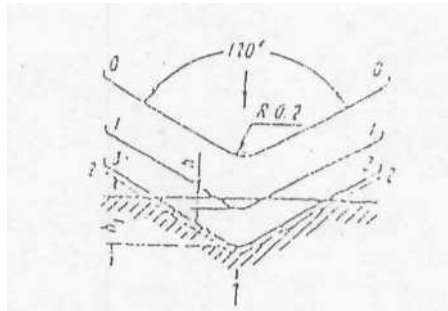
- Kondisi dari indentor, dimana indentor yang telah berubah bentuk akan mengakibatkan ketidak akuratan proses indentasi pada permukaan spesimen.
- Keakuratan besar pembebanan yang diberikan, dimana besarnya pembebanan harus diusahakan dengan besarnya penyimpangan yang dapat diabaikan.
- Kondisi permukaan spesimen, dimana kondisi permukaan spesimen **harus** rata dan mewakili material dengan kondisi yang baik.
- Ketebalan spesimen , dimana spesimen harus cukup tebal sehingga tidak terjadi lekukan pada bagian belakangnya bila di indentasi.
- Bentuk spesimen, dimana bentuk spesimen harus diusahakan rata dan posisinya normal terhadap indentor. Jika bentuk spesimen silindris, maka harus digunakan landasan berbentuk V, kecuali bagian bawah spesimen itu rata.
- Lokasi pengindentasian, dimana lokasi pengindentasian letaknya harus 2,5 kali diameter indentasi dan jarak antara pengindentasian yang satu dengan yang lain, minimal harus lebih dari 5 kali diameter hasil indentasi.
- Ketidakteraturan dari material, dimana jika variasi struktur dan komposisi kimia pada spesimen, maka hasil pengindentasian yang terbesar adalah yang paling kecil. Apabila area hasil pengindentasian kecil, maka perlu diadakan pengujian kekerasan secara berkali - kali

[3]

2.2.4.1 Pengujian Kekerasan Rockwell

Pada. pengujian kekerasan dengan Rockwell pengukuran langsung dilakukan oleh mesin, dan mesin langsung menunjukkan angka kekerasan dari bahan yang diuji. Cara ini lebih cepat dan akurat. Pada cara Rockwell yang normal, mula - mula permukaan logam yang diuji ditekan oleh indentor dengan

gaya tekan 10 kg, beban awal (minor load P_0) sehingga ujung indentor menembus permukaan sedalam h (lihat gambar 2.4). Setelah itu penekanan diteruskan dengan memberikan beban utama (major load P) selama beberapa saat, kemudian beban utama dilepas, hanya tinggal beban awal pada saat ini kedalaman penetrasi ujung indentor adalah h_0 .



Gambar 2.4 Proses Indentasi Pada Pengujian Kekerasan Rockwell [3]

Keterangan Gambar 2.4 :

- > 0-0 posisi sebelum indentasi
- > 1-1 penetrasi pada saat beban awal P'
- > 2-2 penetrasi pada saat beban penuh ($P' - P$)
- > 3-3 penetrasi setelah beban utama dilepas (P')

Kekerasan diperhitungkan berdasarkan perbedaan kedalaman penetrasi ini karena yang diukur adalah kedalaman penetrasi. Maka pengukuran dapat dilakukan dengan menggunakan dial indicator, dengan sedikit modifikasi yaitu piringan penunjuknya menunjukkan skala kekerasan Rockwell. Dengan cara Rockwell dapat digunakan beberapa skala, tergantung pada kombinasi jenis indentor dan besar beban utama yang digunakan. Macam skala dan jenis indentor dan besar beban utama dapat dilihat pada table 2.4 diatas. Untuk logam biasanya digunakan skala B atau skala C, dan angka kekerasannya dinyatakan dengan R_B dan R_C . Skala B harus digunakan indentor berupa bola baja berdiameter $1/16''$ dan beban utama 100 kg. Kekerasan yang dapat diukur dengan Rockwell B ini sampai R_B 100. Bila suatu pengukuran diperoleh angka diatas 100 maka pengukuran harus diulangi dengan menggunakan skala lain. Kekerasan yang diukur dengan skala B ini relatif tidak begitu tinggi, untuk mengukur kekerasan

logam yang keras digunakan Rockwell C atau Rockwell A. Keterangan beban dan indenter pada uji kekerasan Rockwell dapat dilihat pada table 2.2 dibawah ini [3]

Tabel 2.2 Beban Dan Indenter Pada Uji Kekerasan Rockwell [3]

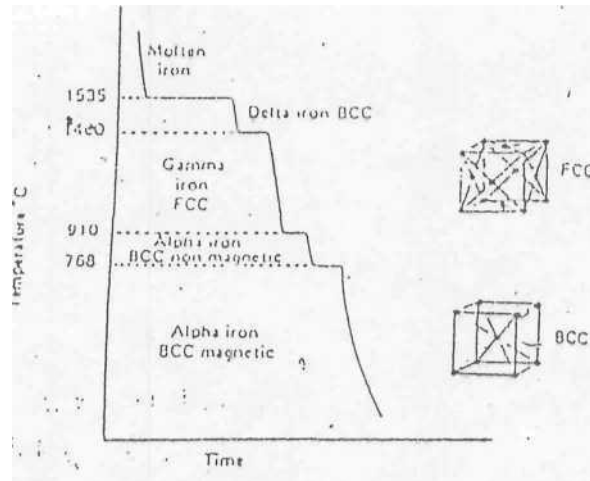
Scale symbol		Major load		Dial figures	Typical applications of scales
		kN	kgf		
B	$\frac{1}{16}$ in (1.588 mm) ball	0.98	100	Red	Copper alloys, soft steels, aluminum, malleable iron, etc.
C	Diamond	1.47	150	Black	Steel, hard cast irons, pearlitic malleable iron, titanium, deep case hardened steel and other materials harder than HKB100
A	Diamond	0.59	60	Black	Cemented carbides, thin steel, and case-hardened steel
D	Diamond	0.98	100	Black	Thin steel and medium case hardened steel and pearlitic malleable iron
E	$\frac{1}{8}$ in (3.175 mm) ball	0.98	100	Red	Cast iron, aluminium and magnesium alloys, bearing metals
F	$\frac{1}{16}$ in (1.588 mm) ball	0.59	60	Red	Annealed copper alloys, thin soft steels

2.3. Struktur Kristal

Susunan atom - atom yang teratur dalam tiga dimensi membentuk suatu pola tertentu dinamakan kristal. Bila dari inti - inti atom dalam suatu kristal ditarik garis - garis imajiner melalui inti - inti atom tetangganya maka akan diperoleh suatu kerangka tiga dimensi yang disebut *space lattice* (kisi Ruang). *Space lattice* ini dapat dianggap tersusun dari sejumlah besar *unit cell* (sel satuan). *Unit cell* merupakan bagian terkecil dari *space lattice*, yang bila disusun ke arah sumbu - sumbunya akan membentuk *space lattice*. Ada tiga macam *space lattice* yang sering dijumpai pada logam - logam yang biasanya digunakan, yaitu :

1. *Face Centered Cubic* (FCC) atau Kubus Pemusatan Sisi (KPS)
2. *Body Centered Cubic* (BCC) atau Kubus Pemusatan Ruang (KPR)
3. *Hexagonal Close Packed* (HCP) atau Hexagonal Tumpukan Padat

Lihat lampiran 6. Ada kurang lebih lima belas unsur yang memiliki sifat allotropi, termasuk besi. Pada temperatur kamar besi memiliki struktur *space lattice* BCC (dinamakan besi alpha, α), pada temperatur antara 910 °C - 1400 °C *space lattice*nya FCC (besi gamma, γ) dari di atas 1400 °C sampai mencair *space lattice*nya BCC (bentuk delta). Bila temperatur kembali lagi maka struktur *space lattice* juga akan kembali seperti semula.



Gambar 2.5 Perubahan struktur kristal pada pendinginan besi

2.4 Pengaruh Komposisi Kimia Pada sifat mekanik

Sifat mekanik suatu bahan sangat tergantung pada komposisi kimianya. Setiap unsur atau paduan mempunyai karakter yang dapat menyebabkan dampak positif dan negatif terhadap sifat mekanik suatu material, antara lain :

- Karbon (C)

Pada semua besi cor, karbon (C) merupakan unsur yang penting karena mempengaruhi persentase jumlah grafit dan karbida. Kenaikan kadar karbon (C) akan meningkatkan jumlah grafit dan kecenderungan untuk membentuk karbida juga makin besar. Komposisi eutektik dinyatakan dalam bentuk karbon equivalent (CE). Meningkatkan kekuatan tarik tetapi juga memiliki efek yang kecil terhadap kekerasan dan elongasi. CE tersebut diformulasikan sebagai berikut:

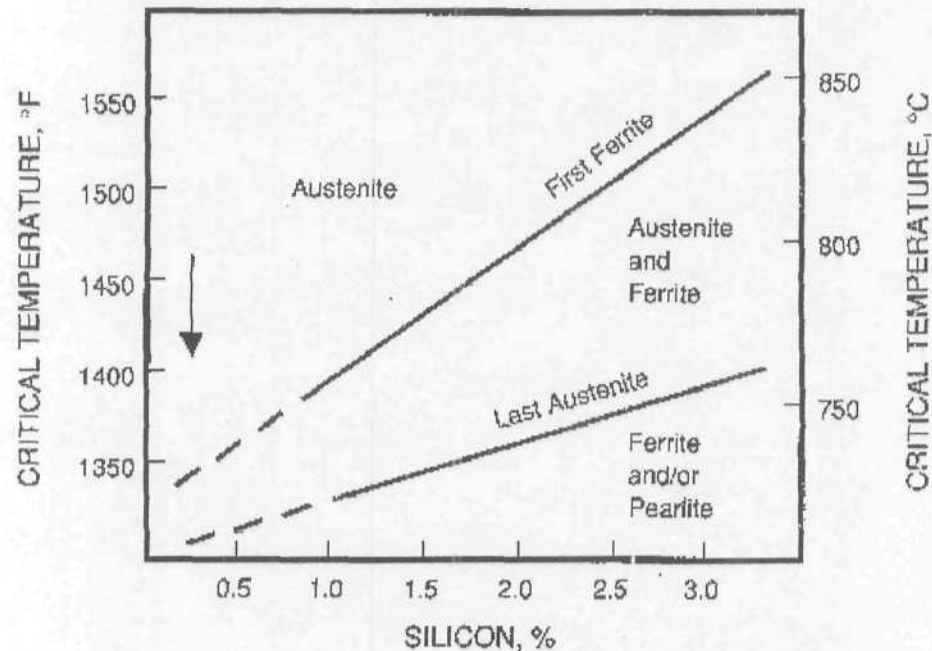
$$CE = \% \text{karbon} + 0,312 \% \text{ Si} + 0,33 \% \text{ P} - 0,078 (\% \text{ Mn} - 1,8 \% \text{ S})$$

- Silikon

Silikon merupakan unsur terbesar setelah karbon dalam besi cor nodular. Kehadirannya memiliki kecenderungan untuk mempengaruhi komposisi dari temperatur eutektik (CE). Silikon merupakan unsur pembentuk grafit dan ferit. Kenaikan kadar silikon akan meningkatkan jumlah grafit dan mengurangi terbentuknya karbida karena silikon menciptakan inti - inti grafit yang menyebabkan Fe_3C (sementit) menjadi stabil. Pengaruh kadar silikon terhadap jumlah grafit dan matrik yang dihasilkan dapat

dilihat pada keterangan gambar 2.5. Kenaikkan kadar silikon juga menaikkan rasio ferit - perlit dan mengeraskan baik perlit maupun ferit.

[1]



Gambar 2.6 Pengamh Kadar Silicon Dan Teraperatur Pemanasan Terhadap Prosentase Jiunlah Matrik Pada Besi Cor Nodular [1]

- Mangan (Mn)

Mangan dapat meningkatkan kekerasan. Mangan juga sangat berpengaruh terhadap kadar sulphur (S). Tanpa Mn, sulphur akaii membentuk FeS dibatas butir selama pembekuan. Dengan mangan, Mn akan mengikat S menjadi MnS yang terdistribusi pada seluruh struktur mikro. Sehingga jumlah ferit bebas akan maksimum dai kekerasan akan minimuin. Kelebihan Mn dari kondisi seimbang akan menyebabkan terjadinya struktur perlit dan menaikkan kekerasan daa kekuatan.

- Phospor (P)

Phospor mempunyai pengaruh liampir sama dengan Si tetapi lebih kuat.

- Kenaikan kadar P pada besi cor nodular akan menyebabkan terbentuknya fasa steadit yang keras dan getas, sehingga kenaikan kadar P akan mengurangi ketangguhan dan keuletan material. Untuk memperoleh

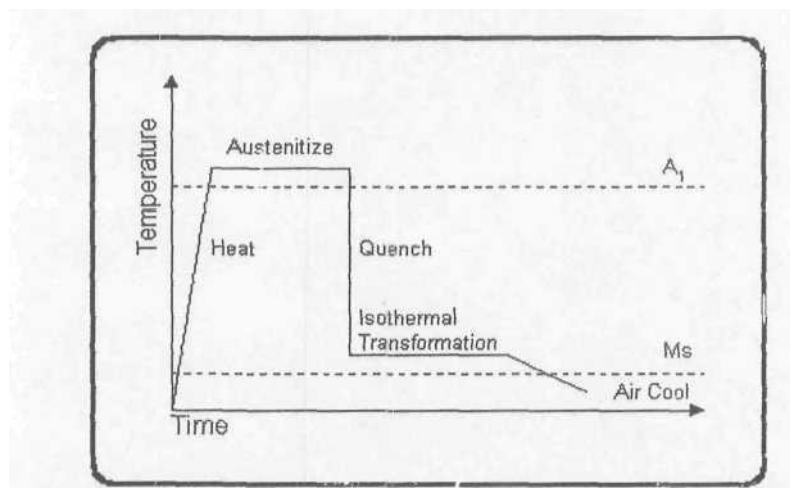
kekuatan impak dan keuletan yang tinggi kadar P yang ditambahkan maksimum 0,04 %.

2.5 Pengaruh Proses Perlakuan Panas Pada Sifat Mekanik

Proses perlakuan panas ini pada umumnya dilakukan untuk memperbaiki sifat mekanik dari logam. Dalam hal ini perlakuan panas dilakukan untuk memperbaiki sifat mekanik besi cor nodular atau *ductile iron*. Pada besi cor nodular hampir semua perlakuan panas menyangkut transformasi dekomposisi austenit. Sifat mekanik yang diperoleh tergantung struktur mikro hasil transformasi. Parameter-parameter yang mempengaruhi struktur mikro hasil transformasi adalah :

- Temperatur pemanasan
- Laju pemanasan
- Waktu pemanasan
- Laju pendinginan

Penentuan keempat parameter tersebut dipengaruhi oleh komposisi kimia dan tebal penampang. Untuk keterangan lebih lanjut mengenai proses perlakuan panas dapat dilihat pada gambar 2.7 [1]



Gambar 2.7 Proses Laku Panas [1]

2.6 Proses Annealing

Annealing adalah suatu proses laku panas (heat treatment) yang sering dilakukan terhadap logam/paduan dalam proses pembuatan suatu produk. Pada dasarnya annealing dilakukan dengan memanaskan logam/paduan sampai

temperatur tertentu, menahan pada temperatur tertentu tadi selama waktu tertentu agar tercapai perubahan yang diinginkan lalu mendinginkan logam/paduan tadi dengan laju pendinginan yang cukup lambat. Annealing dapat dilakukan terhadap benda kerja dengan kondisi yang berbeda - beda dan dengan tujuan yang berbeda - beda pula. Karena itii ada banyak sekali jenis annealing, tergantung pada jenis/kondisi benda kerja, temperatur pemanasan, lamanya *holding time*, laju pendinginan dan lain - lain. Ada yang disebut *full annealing*, *stress relief annealing*, *normalizing*, *spheroidising*, *homogenizing* dan lain-lain. Pada Penelitian ini yang dilakukan adalah *full annealing*. Proses *full annealing* ini dilakukan untuk membuat besi cor nodular menjadi lebih lunak, memperbaiki sifat mampu mesin, menghilangkan tegangan dalam, memperbulat bentuk grafit. Besi cor nodular yang mempunyai matrik feritik-perlitik bila dianil sebagian perlitnya akan berubah menjadi ferit karena pada saat austenisasi akan terjadi difusi atom karbon (C) dari perlitik kesekitar grafit. Pengaruh proses annealing pada sifat mekanik adalah meningkatkan keuletan, menurunkan kekuatan dan kekerasan.

Tahap - tahap proses anil adalah sebagai berikut:

- Pemanasan sampai temperatur (900 °C). Waktu pemanasan tergantung komposisi kimia dan tebal penampang atau minimal 2jam.
- Kemudian diturunkan sampai temperatur 700 °C dan ditahan pada temperatur tersebut dengan waktu penahanan minimal 5 jam.
- Penurunan ke temperatur kamar dapat dilakukan dengan berbagai cara, yaitu:
 - > Pendinginan dalam tungku (*full annealing*)
 - > Pendinginan udara (*normalizing*)
 - > Dari temperatur 700 °C diturunkan terlebih dahulu sampai temperatur 480 °C kemudian diikuti pendinginan udara atau tungku.

Table 2.3 Rekomendasi untuk proses annealing besi cor nodular. [1]

Type of Anneal	Purpose	Temperature (a)	Time	Cooling Cycle (b)
Low temperature (Ferritizing)	In absence of carbides. To obtain Grades 60-45-12, 60-40-18	1325 to 1350F (720 to 730C)	1 hour per inch of cross section	Furnace cool (100F or 55C per hour) to 650F (345C). Air Cool.
Full (for lower silicon content iron)	In absence of carbides. To obtain Grade 60-40-18 with max. low temperature impact strength	1600 to 1650F 870 to 900C	only to equalize at control temperature	Furnace cool (100F or 55C per hour) to 650F (345C). Air Cool.
High temperature (Graphitizing)	In presence of carbides. To obtain Grades 60-45-12, 60-40-18	1650 to 1700F 900 to 925C	2 hours minimum	Furnace cool @200F (95C) per hour to 1300F (700C). Furnace cool @ 100F (55C) per hour to 650F (345C) Air cool.
Two stage Graphitizing and Ferritizing	In presence of carbides. To obtain Grades 60-45-12, 60-40-18 where rapid cooling is practical	1600 to 1650F 870 to 900C	1 hour per inch of cross section	Fast cool to 1250 to 1300F (675 to 700C). Reheat to 1350F (730 C). 2 hours per inch of cross section. Air cool.

(a) Temperature of castings.

(b) Slow cooling from 1000 to 650F (540 to 315C) is to minimize residual stresses.

2.7 Proses Austempering

Proses austempering adalah proses transformasi dekomposisi austenit secara isothermal pada temperatur antara 230 °C - 540 °C, yaitu pada temperatur pembentukan antara perlit dan martensit. Matrik yang terjadi pada proses ini adalah ferit dan kairbida yang disebut dengan bainit, dimana struktur ini memiliki kekuatan yang lebih baik dari pada sebelumnya.

Proses austempering dimulai dengan proses austenisasi, keraudian spesimen diquenching pada suatu media pencelupan pada temperatur media pencelupan tersebut. Austenit dibiarkan bertransformasi secara isothermal untuk jangka waktu tertentu, kemudian spesimen dikeluarkan dari media pencelupan dan diikuti dengan pendingman udara.

Berikut langkah - langkah proses austempering :

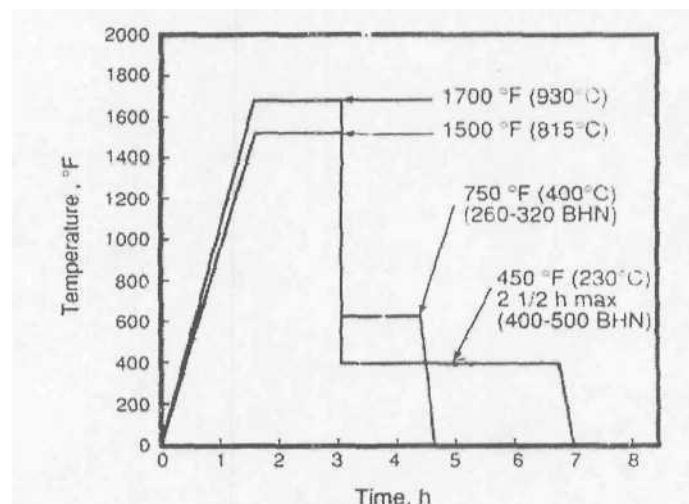
1. pemanasan besi cor nodular sampai temperatur austenisasi, yaitu sekitar 815-927 °C.
2. menahan temperatur tersebut sampai beberapa lama kurang lebih 2 jam.
3. melakukan quenching/pendinginan secara cepat untuk menghindari terbentuknya martensite sampai temperatur 232 - 400 °C.

4. menahan temperatur tersebut sampai beberapa jam, dimana dirasa cukup untuk menghasilkan bainit.
5. pendinginan udara pada temperatur kamar.

Untuk media pencelupan pada proses quenching dapat digunakan garam cair pada temperatur tinggi, hot oil dengan suhu sampai 243 °C (470 °F) , air dan timah cair. Adapun beberapa karakteristik yang perlu diperhatikan pada proses austempering, yaitu antara lain :

- waktu dan temperatur austenisasi
- laju pendinginan
- waktu dan temperatur austempering

Penentuan ketiga parameter tersebut dipengaruhi oleh komposisi kimia dari tebal penampang balok. Untuk keterangan lebih lanjut mengenai keempat parameter tersebut dapat dilihat pada gambar 2.8 siklus proses austempering dengan waktu dan temperatur austenisasi serta austempering yang berbeda

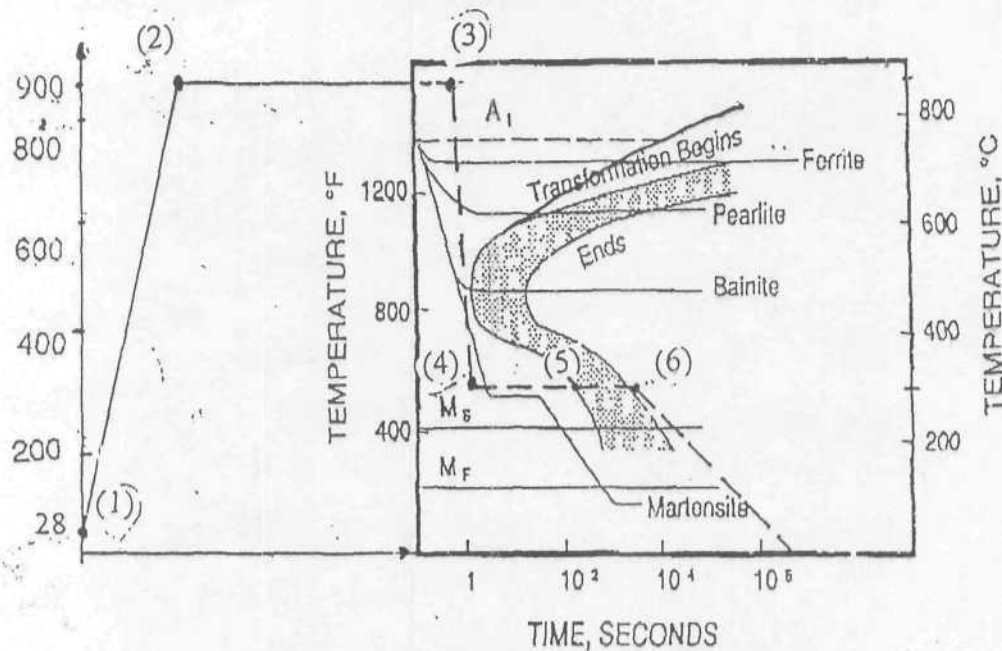


Gambar 2.8 Pengaruh Siklus Proses Austemper Dengan Waktu Dari Temperatur Yang Berbeda Terhadap Kekerasan

Selain itu temperatur austemper harus dilakukan di atas temperatur M_s . Hal ini dilakukan untuk menghindari terbentuknya martensit. Sebab martensit terbentuk pada temperatur di bawah M_s untuk keterangan lebih lanjut lihat gambar 2.8 Diagram TTT besi cor Nodular. Bainit terbentuk pada transformasi isothermal dari austenit pada temperatur di bawah "hidung". Pada temperatur yang lebih tinggi diperoleh upper bainit (bainit atas) yang sering disebut *feathery bainit*

karena bentuknya terlihat mirip buln. ayam. Sedang pada temperatur yang lebih rendah diperoleh *lower bainite* (bainit bawah) atau disebut juga acicular bainit karena bentuknya seperti sekumpulan jarum - jarum yang berserakan. Sebenarnya kedua bainit ini juga terdiri dari ferit dan cementit. Bainit tidak berbentuk *lamellar* seperti perlit tetapi berupa cementit platelet yang terperangkap dalam ferit yang halus. Kekerasan bainit berkisar antara Rockwell C 40 -60, lebih kuat dari perlit, lebih tangguh dan lebih ulet dari martensit.

Dalam pendinginan, waktu melewati temperatur kritis A_1 austenit (besi gamma, FCC) akan mengalami perubahan *allotropic* menjadi besi α (BCC), dan karena besi α tidak mampu melarutkan karbon sebanyak besi gamma maka karbon yang tadinya berada dalam besi gamma akan keluar dari larutan dan membentuk inti cementit di batas butir austenit. Sementara makin banyak karbon yang keluar dari austenit membentuk cementit, austenit disekitar cementit makin miskin karbon dan akan menjadi ferit (besi α). Untuk berubahnya austenit menjadi ferit ini harus dikeluarkan sejumlah karbon, dan karbon ini menjadi cementit dengan demikian akan diperoleh struktur yang berlapis - lapis (*lamellar*) yang dinamakan perlit. Perpindahan atom - atom ini berlangsung secara difusi, karenanya memerlukan waktu yang cukup panjang. Karena itulah perlit akan terjadi pada pendinginan yang berlangsung lambat. Bila Besi gamma dipaksa berada pada temperatur dibawah temperatur kritis A_1 maka akan ada *driving force* yang akan mendorong atom - atom besi gamma untuk menibah posisinya agar menjadi besi α . Makin jauh temperaturnya dibawah temperatur kritis A_1 makin besar *driving force* ini, sehingga sebagian dari austenit serta merta akan menjadi ferrit tidak mampu melarutkan karbon sebanyak itu, maka karbon yang terperangkap ini secara difusi akan keluar membentuk cementit pada arah/ bidang *kristalografik* tertentu dari ferrit yang terbentuk. Struktur yang terbentuk dengan cara inilah yang dinamakan bainit. Ini akan terjadi bila austenit didinginkan cepat sampai ke temperatur di bawah "bidung" diagram TTT (tetapi masih di atas garis M_f) dan dibiarkan pada temperatur itu sampai transformasi berakhir. Proses pembentukan bainit ini dapat dilihat pada gambar 2.9



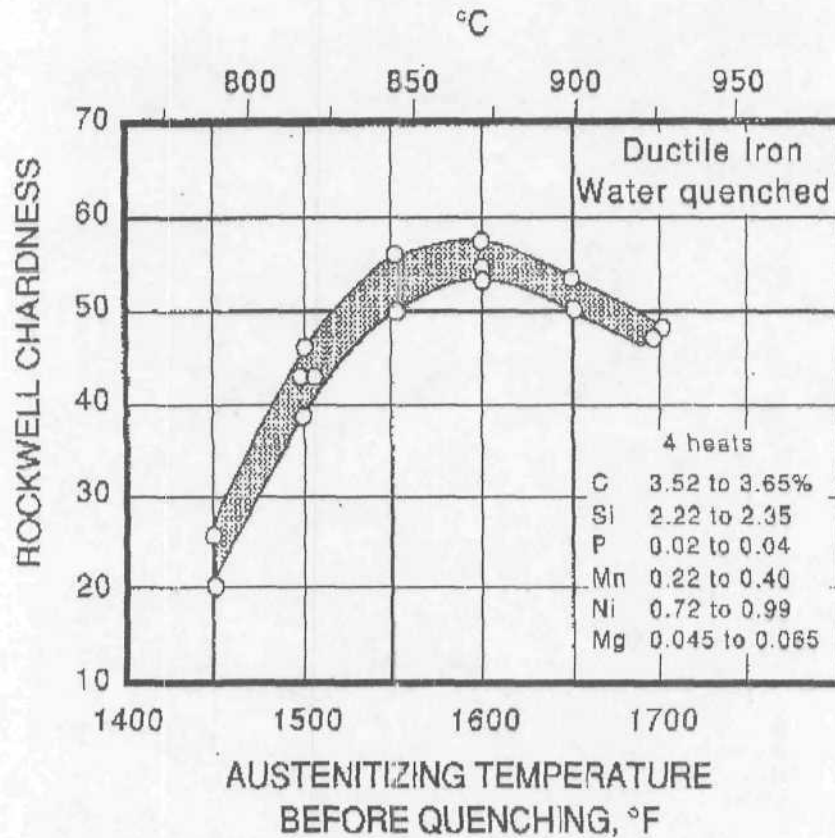
Gambar 2.9 Diagram TTT Besi Cor Nodular [1]

Keterangan:

1. Ferit, perlit dan grafit
2. Ferit, austenit dan grafit
3. Ferit, austenit homogen dan grafit
4. Ferit, austenit dan grafit
5. Awal pembentukan bainit, ferit dan grafit
6. Akhir pembentukan bainit, ferit dan grafit

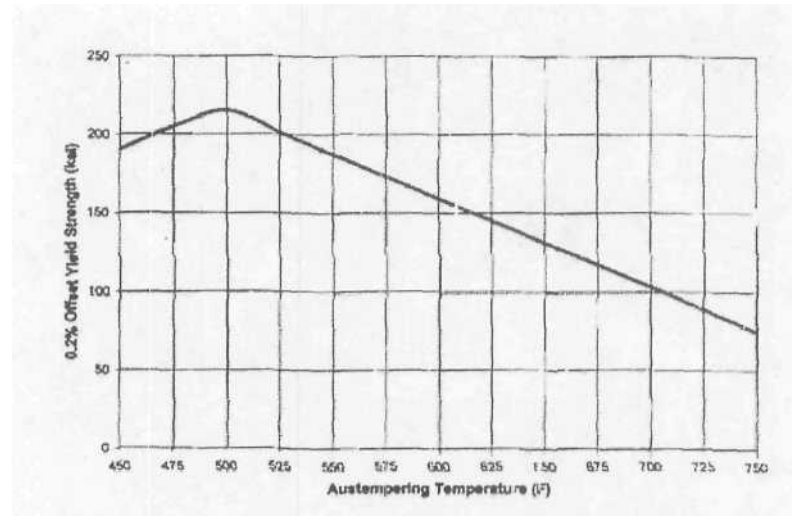
2.7.1 Pengaruh Proses Austempering Terhadap Sifat Mekanik

Temperatur austenisasi juga mempengaruhi kekerasan suatu material. Pada besi cor nodular dengan proses perlakuan panas austempering, kekerasan maksimum terjadi pada temperatur 850 °C - 900 °C. Setelah mencapai temperatur 900 °C kekerasan besi cor akan menurun. Maka pada temperatur 875 °C merupakan titik balik dari peningkatan kekerasan, seperti yang diperlihatkan gambar 2.9. Sedangkan temperatur austemper juga mempengaruhi kekerasan pada spesimen besi cor nodular feritik perlitik. Hal ini telah dijelaskan pada gambar 2.10, dimana pada temperatur austemper 230 °C maka akan diperoleh kekerasan yang maksimum yaitu 400 - 500 BHN.



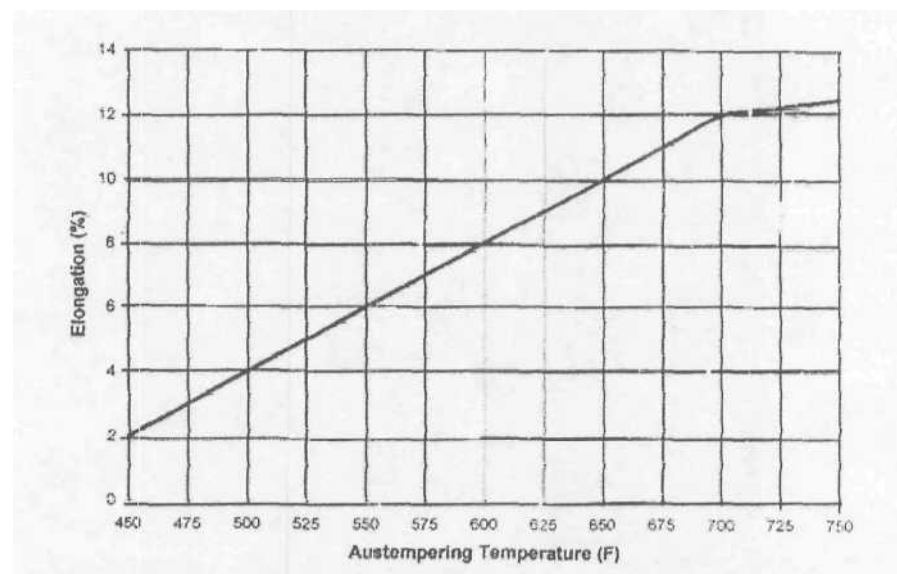
Gambar 2.10 Pengaruh Proses Austenisasi Sebelum Quenching Terhadap Kekerasan [1]

Sedangkan pengaruh proses austempering pada *yield strength* dapat dilihat pada gambar 2.11, peningkatan *yield strength* terjadi mulai temperatur 400 °F - 500 °F setelah itu menurun. Jika ingin memperoleh *yield strength* yang optima) maka proses austemperiig ini sebaiknya dilakukan pada temperatur 500 °F. dan proses austempering ini tidak baik dilakukan pada temperatur diatasnya karena *yield sirength* semakin raenurun.



Gambar 2.11 Pengaruh Proses Austempering Terhadap *Yield Strength* Pada Besi Cor Nodular [1]

Sedangkan proses austempering juga berpengaruh pada elongation besi cor nodular feritik perlitik. Semakin tinggi temperatur austempering maka semakin tinggi pula prosentase kenaikan elongation besi cor nodular feritik perlitik. Kenaikan relatif tinggi pada temperatur 450 °F - 700 °F, setelah itu kenaikannya tidak seberapa besar lagi. Grafik peningkatan elongasi dapat dilihat pada gambar 2.12



Gambar 2.12 Pengaruh Proses Austempering Terhadap Elongasi Pada Besi Cor Nodular [1]

2.7.2 Pengaruh Proses Austempering terhadap Struktur Mikro

Struktur mikro besi cor nodular hasil proses perlakuan panas austempering terjadi perubahan dimana butiran grafit bulat tampak semakin kecil dan terbentuk bainit di sekeliling grafit. Mekanisme pembentukan bainit pada besi cor nodular sedikit berbeda dengan baja. Karena adanya grafit maka pengintian ferit juga terjadi pada daerah sekitar grafit. Selain itu kadar silikon tinggi pada besi cor akan menghambat terbentuknya austemper antara 230 °C - 540 °C [1]

2.8 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi merupakan pengujian untuk meneliti struktur mikro maupun makro dari suatu material logam maupun paduannya guna mendukung penelitian maupun pengendalian mutu dalam suatu industri. Pengujian metalografi selalu meliputi studi mengenai karakteristik dari logam secara mikroskopis. Struktur mikro dapat memberikan banyak informasi mengenai keadaan dan pengerjaan yang telah diterima suatu material. Pengujian metalografi ini mempunyai tujuan:

- Mengetahui struktur mikro dari suatu bahan logam dan paduannya.
- Dapat membedakan struktur mikro material satu dengan material yang *lain*
- Mengamati bentuk serta ukuran dari butiran grafit
- Melihat dan mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi

Struktur mikro yang diamati melalui pengujian metalografi sangat mempengaruhi sifat mekanis dari suatu logam. Standar pengujian metalografi ada beberapa macam, yaitu menurut standar ASM, ASTM, JIS, JCC.