



MODUL : METALURGI FISIK

UNIVERSITAS HARAPAN MEDAN
Fakultas Teknik dan Komputer
2021

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Modul Mata kuliah Metalurgi Fisik (21-3-09-3-5-07-2) ini berhasil disusun dengan semaksimal mungkin. Modul ini disusun mengacu pada silabus mata kuliah yang diberlakukan untuk program S1 yang disajikan pada tiap semester dengan jumlah SKS 2 (Dua). Modul ini diterbitkan untuk kalangan sendiri pada Program Studi Teknik Mesin FAKULTAS TEKNIK DAN KOMPUTER UNIVERSITAS HARAPAN MEDAN .Penulis mengucapkan terimakasih atas suport dan masukan yang diberikan teman teman Dosen di Fakultas Teknik dan Komputer Universitas Harapan Medan, selama penyusunan Modul ini.

Modul mata kuliah Tugas Rancangan Elemen Mesin ini diharapkan bisa membantu mahasiswa dalam memahami materi yang disampaikan Dosen. Dalam Modul ini menyajikan bermacam-macam contoh soal dan latihan soal dalam setiap BAB, yang mana mahasiswa diharapkan bisa memanfaatkan dengan baik untuk memperkuat pemahaman materi setiap BAB. Namun demikian, mahasiswa sebaiknya juga membaca buku-buku referensi yang lain tentang Metalurgi Fisik ini sehingga diperoleh informasi yang lebih lengkap dalam upaya memahami materi perkuliahan.

Bagaimanapun, diktat ini masih diperlukan perbaikan secara bertahap, oleh karena itu mohon kritik dan saran untuk kesempurnaan Modul ini.

Kami menyampaikan terimakasih kepada semua pihak yang membantu penulisan diktat ini. Semoga bermanfaat bagi pembaca.

Medan, Januari
2021

Penulis

(Ir.Junaidi,M.M.,M.T.

NIDN :010303630

DAFTAR ISI

- BAB.1. STRUKTUR MIKRO.**
- BAB.2.CACAT KRISTAL LOGAM.**
- BAB.3.DEFORMASI DAN REKRISTALISASI.**
- BAB.4.TRANFORMASI FASA.**
- BAB.5.DIAGRAM BESI – BESI KARBIDA.**
- BAB.6.DIAGRAM TTT DAN CCT.**
- BAB.7.BAB.7HARDENABILITY.**
- BAB.8.PERLAKUAN PANAS.**
- BAB.9.MEKANISME PENGUATAN.**
- BAB.10. MEKANISME PENGUATAN**

BAB.1. STRUKTUR MIKRO

Data mengenai berbagai sifat logam yang mesti dipertimbangkan selama proses akan ditampilkan dalam berbagai sifat mekanik, fisik, dan kimiawi bahan pada kondisi tertentu. Untuk memanfaatkan data tersebut sebaik mungkin, perlu diketahui sifat asal logam yang menyebabkan logam menjadi kuat dan bagaimana sifat itu berubah selama proses produksinya.

Sifat bahan diperoleh dari hasil:

- (i) interaksi antar atom bahan;
- (ii) perilaku gugus-gugus atom tersebut (mungkin mempunyai struktur kristalin yang teratur);
- (iii) atribut yang berkaitan dengan gabungan gugus-gugus atom tersebut.

Untuk memperoleh pengertian mendasar mengenai sifat bahan, dalam bab ini akan dibahas pengaruh struktur atom, struktur kristalin, dan perilaku bahan dalam bentuknya yang utuh.

1.1 Jenis Ikatan dalam bahan padat

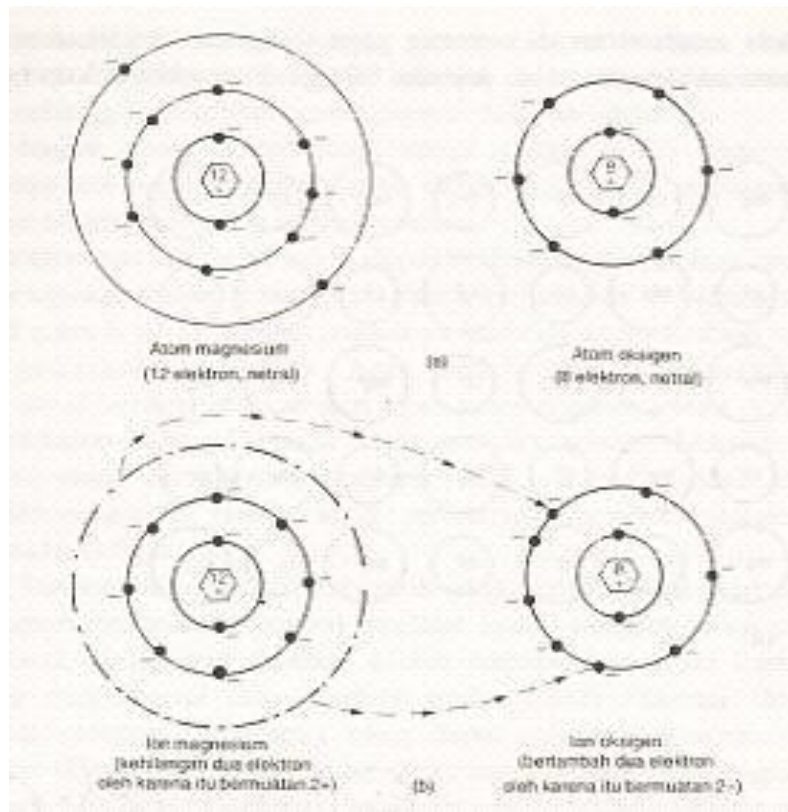
Atom terdiri atas inti atom bermuatan positif yang dikelilingi oleh sejumlah elektron (yang dianggap tidak bermassa), jumlah muatan elektron sama dengan muatan inti sehingga secara keseluruhan atom itu netral, dan tidak bermuatan. Elektron tersusun dalam beberapa tingkatan energi atau kulit energi. Kulit energi terluar mempunyai ikatan yang paling lemah dengan intinya. Gambar 1.1(a) memperlihatkan gambaran dua dimensi untuk magnesium, jenis atom logam yang memiliki dua elektron pada kulit terluar, dan oksigen, atom unsur bukan logam yang mempunyai enam.

elektron pada kulit paling luar. Keduanya mempunyai dua elektron pada kulit yang paling dekat dengan intinya.

Kemampuan interaksi antar atom berkurang bila kulit terluar diduduki oleh delapan elektron. Atom yang tidak memiliki konfigurasi ini selalu berusaha untuk membentuk ikatan sedemikian rupa sehingga mencapai konfigurasi ini. Karakteristik inilah yang mendorong terbentuknya tiga jenis ikatan atom yaitu ikatan ionik, ikatan kovalen, dan ikatan logam.

Ikatan Ionik

Ikatan ionik terjadi antara atom logam dan atom bukan logam dan merupakan ikatan yang sangat kuat. Bahan dengan ikatan ionik mempunyai ciri: temperatur lebur tinggi, keras, dan rapuh. Ikatan ionik terbentuk bila atom oksigen "menangkap" dua elektron terluar atom magnesium (Gambar 1.1(b)). Dengan demikian, atom oksigen bertambah dua muatan negatif dan atom magnesium kehilangan dua elektron terluarnya sehingga mempunyai kelebihan dua muatan positif. Baik oksigen maupun magnesium kini memiliki delapan elektron pada kulit terluarnya dan mencapai keseimbangan kimiawi seperti gas mulia. Akan tetapi, kedua atom yang tadinya netral itu sekarang mempunyai muatan elektrostatik yang berlawanan dan inilah yang menghasilkan ikatan ionik, seperti tampak pada Gambar 1.2(a) yang merupakan gambar dua dimensi senyawa oksida magnesium (MgO).



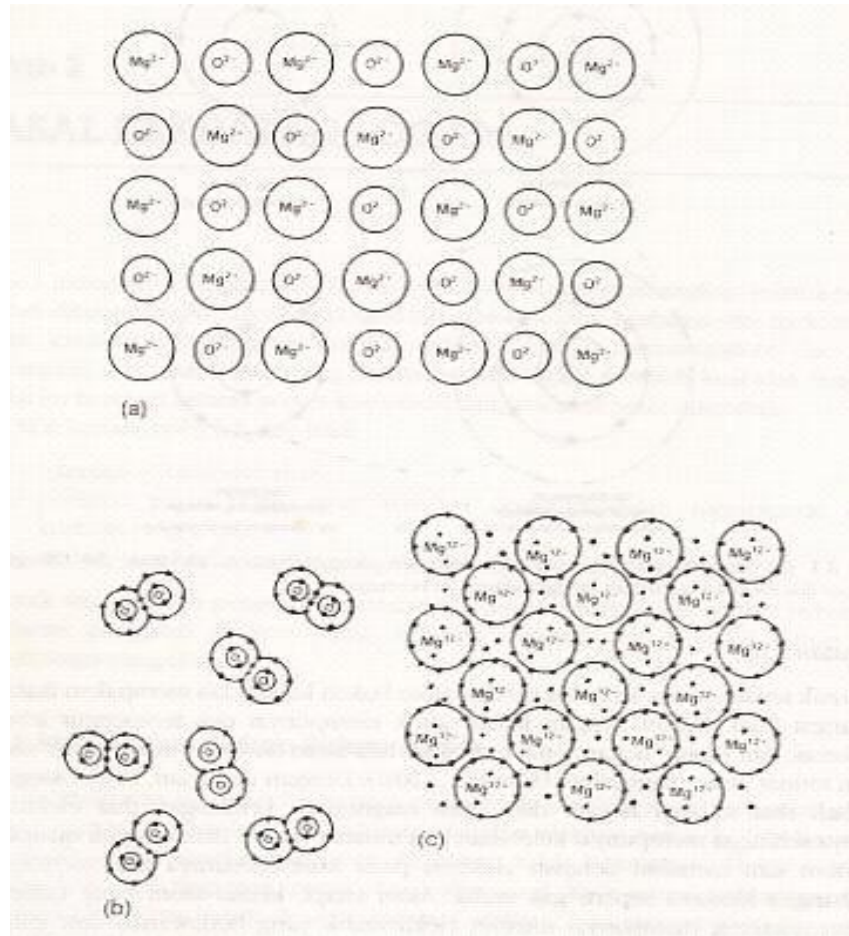
Gambar 1.1: Konfigurasi ikatan atom

Atom bermuatan sejenis tolak menolak, sedangkan atom dengan muatan berlawanan tarik menarik. Jadi, pada bahan utuh yang terdiri atas atom yang berikatan ionik, terbentuk struktur kristal dengan pola teratur dalam tiga dimensi. Tiap atom dikelilingi oleh atom dengan muatan yang berlawanan. Kekuatan senyawa seperti ini ditentukan oleh kekuatan ikatan elektrostatik antar atom tak sejenis, dan kerapuhannya ditentukan oleh ketahanan atom bermuatan terhadap usaha yang memaksanya menduduki posisi dekat dengan atom yang bermuatan sama. Oksida magnesium menentang gaya yang mendekatkan atom oksigen dan atom magnesium dengan atom sejenis. Bila gaya tersebut cukup besar, kristal akan retak.

Ikatan Kovalen

Ikatan kovalen terjadi antara atom dengan empat elektron atau lebih pada kulit terluarnya, suatu kondisi yang dijumpai pada unsur bukan logam. Sebuah atom tak mungkin menampung semua elektron kulit terluar atom lain. Sekiranya hal itu terjadi, maka kulit elektron terluarnya akan kelebihan elektron (jumlah ideal adalah delapan elektron). Bila terdapat empat elektron atau lebih pada kulit terluar, atom sedemikian rupa sehingga mereka dapat berbagi elektron luar, tampak pada Gambar 1.2b.

Gambar 1.2: Konfigurasi ikatan atom



Pada gambar ini terlihat dua atom oksigen berbagi elektron sehingga setiap atom mempunyai delapan elektron. Ikatan antara bagian atom sangat kuat, tetapi ikatan antara pasangan lemah; demikian lemahnya sehingga oksigen tidak dapat beku dan membentuk kristal mencapai temperatur yang sangat rendah.

Bahan yang mempunyai ikatan kovalen dapat berbentuk gas, cairan, atau padatan dan ikatan ini merupakan ikatan yang kuat. Untuk penerapan di bidang teknik, kita mengambil contoh yang relevan, misalnya karbon. Atom karbon mempunyai empat elektron pada kulit terluarnya. Agar jumlah elektron tersebut mencapai delapan, karbon dapat bersenyawa dengan atom karbon lainnya atau dengan empat buah atom berelektron tunggal (pada kulit terluar) seperti hidrogen. Dengan hidrogen, karbon akan membentuk metana (CH_4). Dengan dua atom yang mempunyai elektron ganda (pada kulit terluarnya) seperti oksigen, karbon membentuk dioksida karbon (CO_2).

Dengan atom karbon lain, akan terbentuk dua jenis kristal karbon. Bentuk pertama adalah intan. Intan mempunyai struktur kubik dengan atom pada posisi rangkaian tetragonal, sedangkan bentuk kedua mempunyai atom karbon dalam rangkaian bidang heksagonal dan disebut grafit. Grafit dikenal dengan sifat pelumasnya akibat susunan bidangnya yang dapat saling bergeseran. Walaupun atom karbon dikelilingi oleh delapan elektron, jenis ikatannya agak berbeda. Jarak antar bidang lebih besar daripada jarak antar atom dalam bidang itu sendiri, sehingga gaya ikat antar bidang lemah. Selain itu, ikatan semacam ini menggunakan tiga elektron per atom, sedangkan elektron keempat bebas atau dapat bergerak dalam bidang yang sejajar dengan kulit.

Atom karbon yang membentuk ikatan dengan atom lain seperti hidrogen sering kali membentuk rantai atau untai yang panjang. Ikatan antar atom

yang seperti rantai ini (yang disebut struktur polimer) tidak selalu mencerminkan sifat ikatan kovalen karena, meskipun kuat, rantai juga fleksibel dan ikatan antar rantai yang berdekatan lemah.

Ikatan Logam

Dua pertiga dari unsur mempunyai kurang dari empat elektron pada kulit terluarnya. Meskipun jumlahnya memadai untuk mengimbangi muatan positif inti, bila dua jenis unsur ini membentuk ikatan, jumlah elektron masih kurang untuk membentuk ikatan keseimbangan kimia dan tidak dapat membentuk ikatan ionik atau ikatan kovalen. Dalam keadaan padat, unsur logam membentuk jenis ikatan yang lain sekali, yang menjadi ciri khas logam. Elektron pada kulit terluar suatu logam bergerak sebagai awan melalui ruang antar inti yang bermuatan positif bersama kulit elektron lainnya, lihat Gambar 1.2c.

Inti beserta kulit elektron di bagian dalam dianggap sebagai bola keras yang tersusun padat dengan pola teratur, membentuk apa yang disebut *susunan kristal*. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 1.2.c. Susunan ion positif terikat menjadi satu oleh awan elektron bermuatan negatif membentuk ikatan khas yang disebut ikatan *logam*. Oleh karena ion tidak memiliki kecenderungan khusus untuk menempati lokasi tertentu, ion dapat bergerak dalam kisi kristal tanpa mengganggu keteraturan pola. Selain itu, awan elektron dapat digerakkan ke arah tertentu oleh potensial listrik, dan menghasilkan *arus listrik*. Konduktivitas listrik merupakan karakteristik khas logam. Pada kristal dengan ikatan ion atau ikatan kovalen, elektron terikat dan tidak bebas bergerak. Hanya bila potensial cukup tinggi (potensial tembus), elektron dapat ditarik lepas.

Ikatan dan Pengaruh Gaya Luar

Di samping kemampuan gerak elektron pada ikatan logam, perbedaan besar lain antara ikatan logam dan ikatan lainnya terletak pada perilakunya bila dipengaruhi oleh gaya luar. Gaya kecil tak seberapa pengaruhnya terhadap ketiga jenis ikatan tersebut. Regangan atau perpanjangan yang terjadi lenyap bila gaya ditiadakan. Sifat ini disebut *perpanjangan elastik* atau *kompresi elastik*. Bila gaya cukup besar, pada ikatan logam dapat terjadi pergelinciran ion logam membentuk pola sejenis yang tetap bertahan meski gaya ditiadakan. Ini dimungkinkan karena semua ion memiliki sifat yang sama dan elektron tidak terikat pada atom tertentu. Sebaliknya, atom dengan ikatan ion menentang gerak luncuran tersebut karena antara ion dan elektron terdapat ikatan kuat. Oleh karena itu, bahan dengan ikatan ion cenderung rapuh.

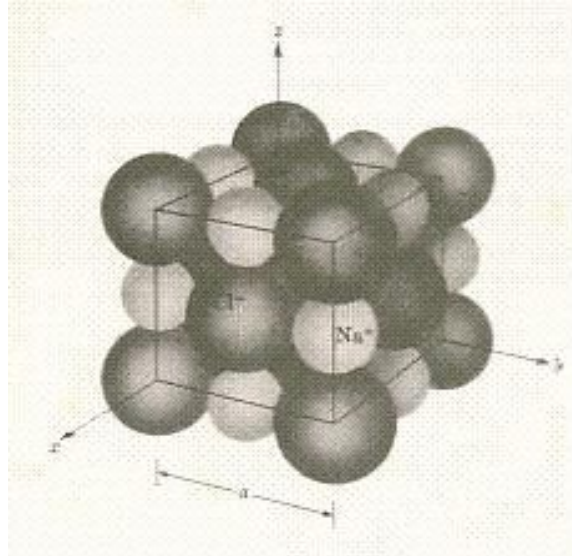
Karena adanya kemampuan inti untuk saling meluncur, kristal dengan ikatan logam dapat dibentuk secara mekanik dan ikatan antar atomnya tetap kuat. Sifat ini disebut *keuletan (ductility)* atau kenyal bentuk dan merupakan karakteristik keadaan logam.

Apa pun bentuk ikatannya, bahan umumnya membentuk susunan tiga dimensi (atau struktur kristal) yang teratur dalam ruang. Ada empat belas jenis struktur, tetapi hanya empat yang biasanya ditemukan pada logam yang digunakan dalam penerapan keteknikan. Sel tunggal sederhana mewakili jumlah atom yang tak terhingga dalam susunan tiga dimensi kristal utuh

1.2 Struktur Mikro Logam

Semua logam, sebagian besar keramik dan beberapa polimer membentuk kristal ketika bahan tersebut membeku. Dengan ini dimaksudkan bahwa atom-atom mengatur diri secara teratur dan berulang dalam pola 3 dimensi. Struktur semacam ini disebut *kristal* (Gambar 1.3).

Gambar 1.3: Struktur Kristal

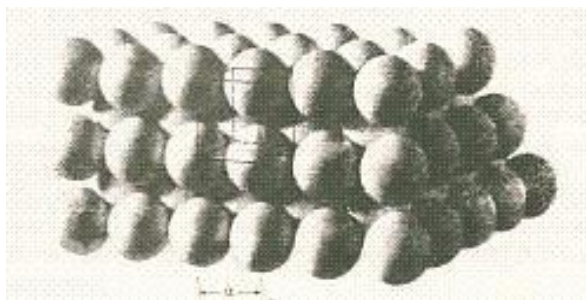


Pola teratur dalam jangkauan panjang yang menyangkut puluhan jarak atom dihasilkan oleh koordinasi atom dalam bahan. Disamping itu pola ini kadang-kadang menentukan pula bentuk luar dari kristal, contoh yang dapat dikemukakan adalah bentuk bintang enam bunga salju. Permukaan datar batu batuan mulia, kristal kwarsa (SiO_2) bahan garam meja biasa (NaCl) merupakan penampilan luar dari pengaturan di dalam kristal itu sendiri. Dalam setiap contoh yang dikemukakan tadi, pengaturan atom di dalam kristal tetap ada meskipun bentuk permukaannya diubah. Struktur dalam kristal kwarsa tidak berubah meskipun permukaannya tergesek sehingga membentuk butiran pasir pantai yang bulat-bulat. Hal yang sama kita jumpai pada pengaturan heksagonal molekul air dalam es atau bunga salju.

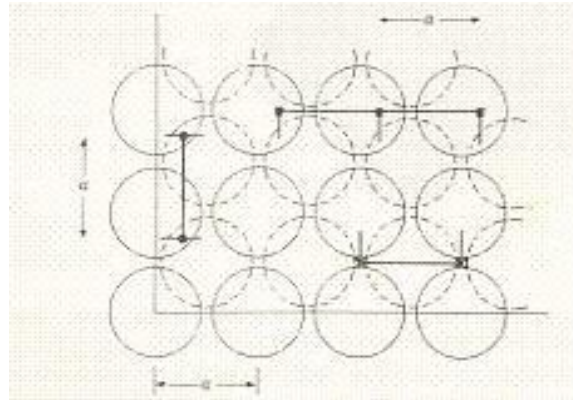
Tata jangkau panjang yang merupakan karakteristik kristal dapat dilihat pada Gambar 1.4. Model ini memperlihatkan beberapa pola atom kisi yang dapat terjadi bila terdapat satu jenis atom. Karena pola atom ini berulangsecara tak terhingga, untuk mudahnya kisi kristal ini dibagi dalam *sel satuan*. Sel satuan ini yang mempunyai volum terbatas, masing-masing memiliki ciri yang sama, dengan kristal secara keseluruhan.

Jarak yang selalu terulang, yang disebut *konstanta kisi*, dalam pola jangkau panjang kristal. menentukan ukuran sel satuan. jadi dimensi yang berulangatau a , (lihat Gambar 1.4.) juga merupakan dimensi sisi sel satuan. Karenapola kristal Gambar 1.4 identik dalam ketiga arah tegak lurus, sel satuan ini berbentuk kubik dan a adalah konstanta kisi dalam ketiga arah koordinat. Dalam kristal bukan kubik, kontanta kisi berbeda dalam ketiga arah koordinat.

Gambar 1.4 : Sel satuan



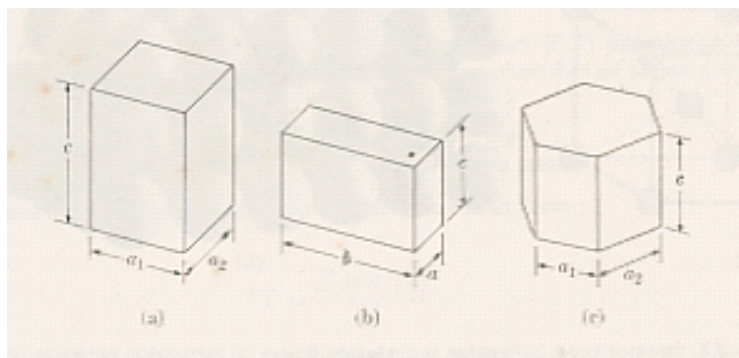
Titik sudut sel satuan dapat ditempatkan *dimana saja* dalam suatu kristal. jadi, sudut tersebut dapat berada dipusat atom, tempat lain dalam atom-atom atau diantara atom-atom, seperti titik pada Gambar 1.5. Dimanapun ia berada, volum yang kecil tadi dapat diduplikasikan dengan volum yang identik disebelahnya (asalkan sel tadi memiliki orientasi yang sama dengan pola kristal) Setiap sel mempunyai ciri-ciri geometrik, yang sama dengan kristal keseluruhan.



Gambar 1.5.: Konstanta kisi

Kristal kubik memiliki pola yang sama sepanjang ketiga sumbu tegak lurus: $a_1 = a_2 = a_3$. Kebanyakan logam dan beberapa jenis keramik berbentuk kubik.

Kristal bukan kubik terjadi bila pola ulangnya tidak sama dalam ketiga arah koordinatnya atau sudut antara ketiga *sumbu kristal* tidak sama dengan 90° . Ada tujuh *sistem kristal*, dengan karakteristik geometriknya seperti tercantum dalam Tabel 1.1. Dalam pelajaran pengantar dasar ilmu logam ini perhatian kita tertuju pada bentuk kristal kubik yang lebih sederhana. Akantetapi disamping itu kita perlu mengenal juga sistem heksagonal. Disamping itu, kristal tetragonal dan ortorombik dengan karakteristik sel satuan seperti Gambar. 1.6



Gambar 1.6: Kristal bukan kubik

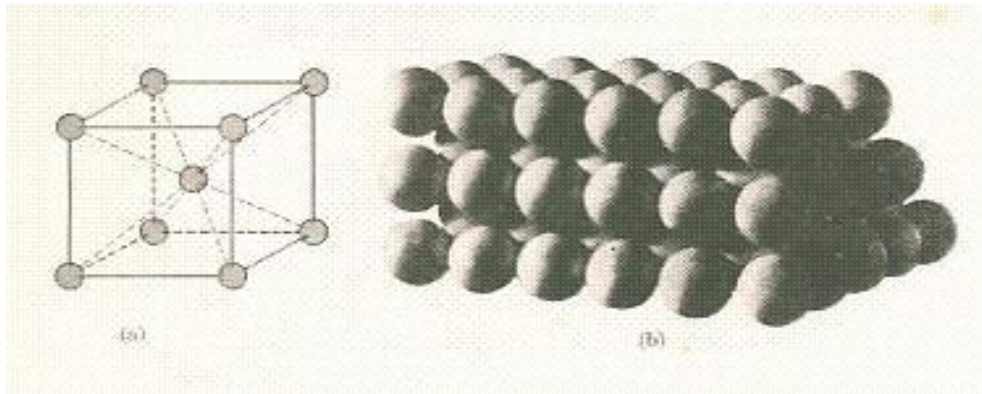
Tabel 1-1 : Sistem kristal.

Sistem	Sumbu	Sudut sumbu
Kubik	$a_1 = a_2 = a_3$	semua sudut = 90^0
Tetragonal	$a_1 = a_2 \neq a_3$	semua sudut = 90^0
Ortorombik	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$	semua sudut = 90^0
Monoklirik	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$	dua sudut = 90^0 satunya $\neq 90^0$
Triklinik	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$	semua sudut berbeda; tidak ada yang = 90^0
Heksagonal	$a_1 = a_2 = a_3 \neq c$	semua sudut 90^0 dan 120^0
Rombohedral	$a_1 = a_2 = a_3$	semua sudut sama, tetapi tidak = 90^0

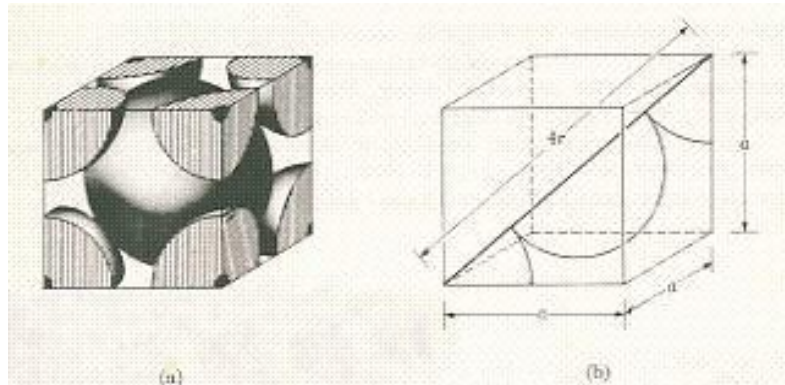
Kristal kubik terdiri dari tiga bentuk kisi, *kubik sederhana*, *kubik pemusatan ruang* dan *kubik pemusatan sisi*. Suatu kisi adalah Pola yang berulang dalam tiga dimensi yang terbentuk dalam kristal. Sebagian besar logam memiliki kisi kubik pemusatan ruang (kpr) atau kisi kubik pemusatan sisi (kps).

1.2.1. Kubik pemusatan ruang.

Besi mempunyai struktur kubik. Pada suhu ruang sel satuan besi mempunyai atom pada tiap titik sudut kubus dan satu atom pada Pusat kubus (Gambar 1.7.) Besi merupakan logam yang paling umum dengan struktur kubik pemusatan ruang, tetapi bukan satu-satunya. Krom, tungsten dan unsur lain juga memiliki susunan kubik pemusatan ruang.



Gambar 1.7: Struktur Kubik pemusatan ruang



Gambar 1.8: Struktur Kubik pemusatan ruang

Tiap atom besi dalam struktur kubik pemusatan ruang (kpr) ini dikelilingi oleh delapan atom tetangga; hal ini berlaku untuk setiap atom, baik yang terletak pada titik sudut maupun atom dipusat sel satuan.

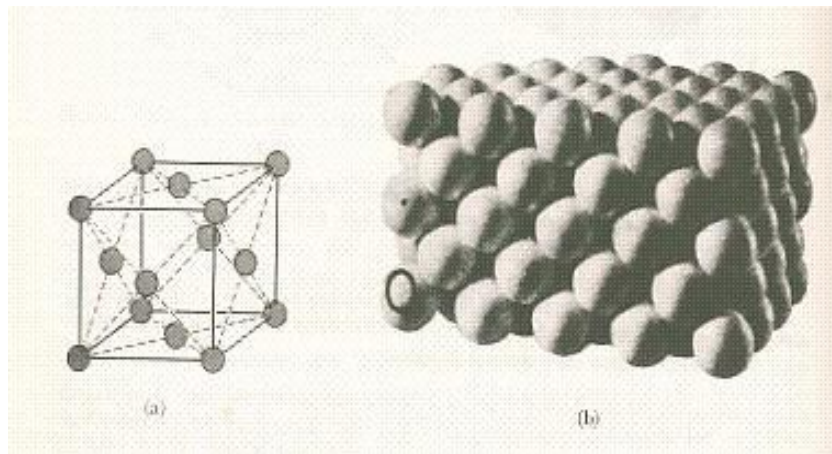
Oleh karena itu setiap atom mempunyai lingkungan geometrik yang sama (Gambar 1.7). Sel satuan logam kpr mempunyai dua atom. Satu atom dipusat kubus dan delapan seperdelapan atom pada delapan titik sudutnya (Gambar 1.8).

Kita dapat menerapkan konsep *tumpukan atom* (F.T) pada logam kpr, dengan menggunakan model bola keras maka fraksi volum dari sel satu yang ditempati oleh bola-bola tersebut

1.2.2. Kubik permusatan sisi.

Pengaturan atom dalam tembaga (Gambar 1.9) tidak sama dengan pengaturan atom dalam besi, meski keduanya kubik. Disamping atom pada setiap titik sudut sel satuan tembaga, terdapat sebuah atom ditengah setiap bidang permukaan, namun tak satupun dititik pusat kubus.

Struktur kubik pemusatan sisi (kps) ini lebih sering dijumpai pada logam, antara lain, aluminium, tembaga, timah hitam, perak dan nikel mempunyaipengaturan atom seperti ini (demikian pula halnya dengan besi pada suhu tinggi).

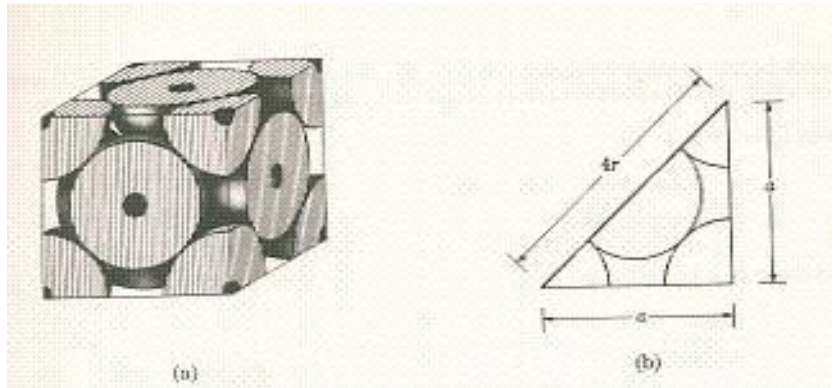


Gambar 1.9 : Struktur Kubik pemusatan sisi

Logam dengan struktur kps mempunyai empat kali lebih banyak atom. Kedelapan atom pada titik sudut menghasilkan satu atom, dan keenam bidang sisi menghasilkan 3 atom per sel satuan. (Gambar 1.9).

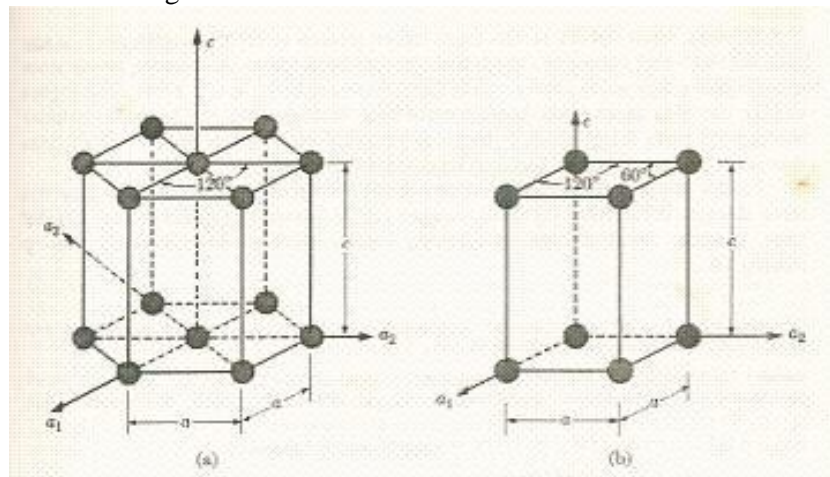
Faktor tumpukan untuk logam kps adalah 0.74, yang ternyata lebih besardari nilai 0.68 untuk logam kpr. Hal ini memang wajar oleh karena setiapatom dalam logam kpr dikelilingi oleh delapan atom . Sedang setiap atomdalam logam kps mempunyai dua belas tetangga. Hal ini dibuktikan dala

Gambar 1.9, dimana kita lihat bahwa atom pada sisi depan mempunyai empat tetangga, empat tetangga yang bersinggungan dengannya dibagian belakang dan empat lagi yang serupa dibagian depannya.

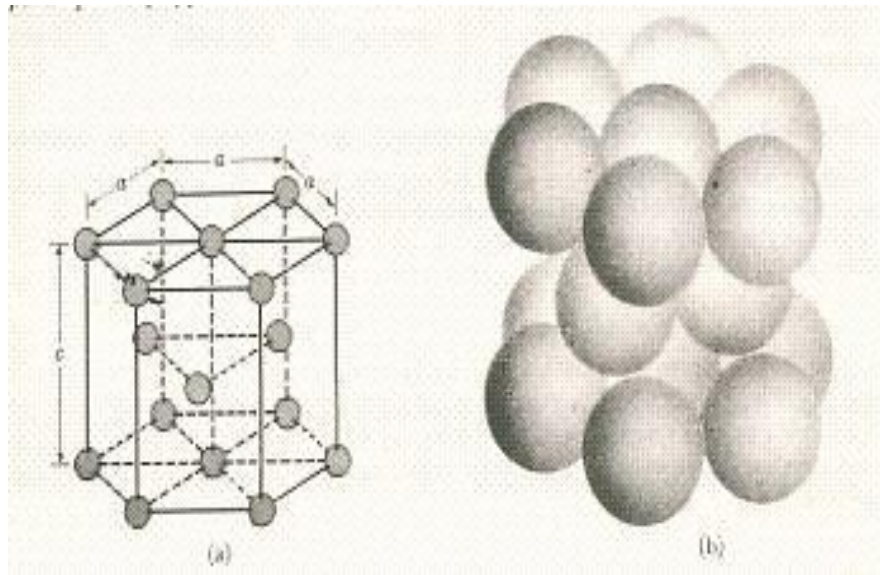


Gambar 1.10: Struktur Kubik pemusatan sisi

1.2.3. Kristal Heksagonal.



Gambar 1.11 : Sel satuan heksagonal sederhana



Gambar 1.12 : Struktur heksagonal tumpukan padat

BAB.2. CACAT KRISTAL LOGAM

2.1. Cacat Kristal

Diperlukan berjuta-juta atom untuk membentuk satu kristal. Oleh karena itu, tidak mengherankan bila terdapat cacat atau ketidakteraturan dalam tubuh kristal. Cacat-cacat inilah yang ikut menentukan sifat bahan secara keseluruhan.

Ketidakmurnian dalam Bahan Padat

Benda yang asli selalu lebih digemari misalnya: madu asli, gula murni dan emas 24 karat. Meskipun benda sempurna, murni atau asli itu lebih baik, ada kalanya karena faktor harga, pengadaan atau sifat-sifat tertentu, diperlukan adanya ketidakmurnian. Sebagai contoh, *perak sterling*, yang mengandung tembaga 7.5% dan perak 92.5%. Bahan ini memang unggul, dapat saja dimurnikan menjadi perak dengan kadar 99% lebih. Harganya akan lebih mahal, sedang kualitas lebih rendah. Tanpa merubah rupa, campuran tembaga 7.5% akan membuat perak itu lebih kuat, keras dan awet dengan harga yang lebih murah.

Dengan sendirinya sifat-sifat itu harus sesuai dengan rancangan kita sendiri. Seng yang dicampurkan pada tembaga menghasilkan *kuningan* yang lebih murah daripada tembaga murni. Kuningan lebih keras, kuat dan ulet dibandingkan tembaga. Sebaliknya, kuningan mempunyai konduktivitas Listrik yang lebih rendah dari pada tembaga, sehingga kita tetap menggunakan tembaga murni untuk penghantar listrik dan penggunaan sejenis lainnya dimana konduktivitas listrik diutamakan.

Paduan adalah kombinasi dari dua atau lebih jenis logam. Kombinasi ini dapat merupakan campuran dari dua struktur kristalin (besi kpr dan Fe_3C

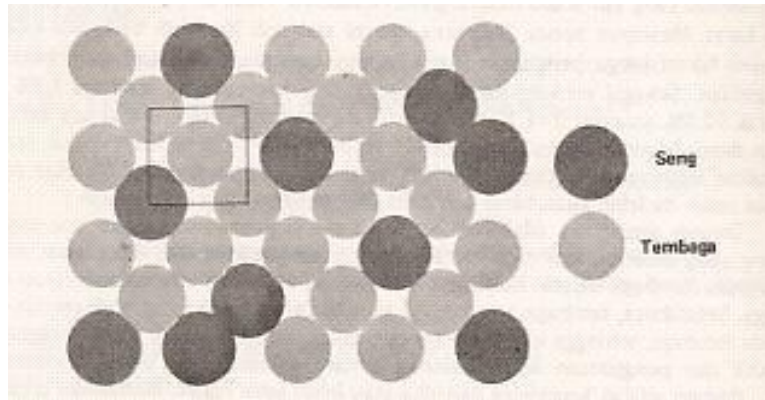
dalam baja konstruksi), atau paduan dapat merupakan *larutan padat*, dan sebagai contoh akan dibahas kuningin. Meskipun istilah paduan digunakan secara umum, kombinasi dari dua atau lebih komponen oksida dapat digunakan dalam produk keramik (contoh: isolator busi, badan pesawat tilpon terdiri dari kombinasi beberapa jenis molekul).

Larutan Padat dalam Logam

Larutan padat mudah terbentuk bila pelarut dan atom yang larut memiliki ukuran yang sama dan struktur elektron yang serupa. Sebagai contoh dapat diambil logam dalam kuningin, tembaga dan seng yang masing-masing mempunyai jari-jari atom 0.1278 nm dan 0.139 nm. Keduanya mempunyai 28 elektron subvalensi dan membentuk struktur kristal dengan bilangan koordinasi 12. jadi, bila seng ditambahkan pada tembaga, maka dengan mudah seng dapat menggantikan kedudukan tembaga dalam kisi kps, sampai maksimal menggantikan 40% dari atom tembaga. Dalam larutan padat tembaga dan seng ini, distribusi seng terjadi secara acak (Gambar 2.1).

Larutan padat substitusi

Larutan padat yang telah diuraikan diatas disebut *larutan padat substitusi* oleh karena atom seng menggantikan atom tembaga dalam struktur kristal. Larutan padat seperti ini sering dijumpai dalam berbagai sistem logam. Contoh lain larutan tembaga dan nikel yang membentuk monel. Pada *monel*, nikel dapat menggantikan atom tembaga dalam struktur tembaga semula dalam perbandingan jumlah manapun. Larutan padat tembaga - nikel berkisar dari 0% nikel dan 100% tembaga sampai 100% nikel dan 0% tembaga. Semua paduan tembaga-nikel berstruktur kubik pemusatan sisi.



Gambar 2.1. Larutan padat substitusi acak

Sebaliknya, timah putih secara terbatas sekali menggantikan tembaga, membentuk perunggu, dan tetap mempertahankan struktur mula tembaga yaitu kubik pemusatan sisi. Timah putih melebihi daya larut padat maksimal akan membentuk fasa lain.

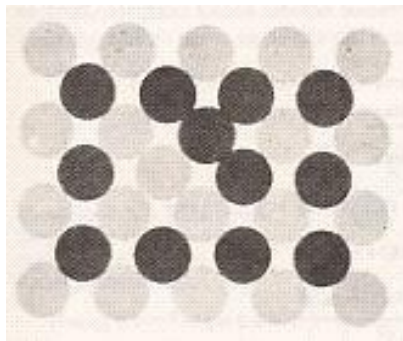
Untuk dapat menggantikan atom lainnya dengan jumlah yang cukup banyak dan membentuk larutan padat substitusi, ukuran dari atom harus sama atau hampir sama. Nikel dan tembaga mempunyai jangkauan larut yang besar karena keduanya mempunyai struktur kps dan jari-jari atomnya masing-masing 0.1246 nm dan 0.1278 nm. Dengan meningkatnya perbedaan ukuran, menurunlah kemampuan substitusinya. Hanya 20% atom tembaga dapat digantikan oleh aluminium karena jari-jari aluminium adalah 0.1431 nm, sedang jari-jari tembaga hanya 0.1278 nm.

Pelarutan padat menjadi terbatas bila terdapat selisih ukuran jari-jari atom melebihi 15%. Pelarutan akan lebih terbatas lagi bila kedua komponennya mempunyai struktur kristal yang berbeda atau valensi yang berlainan. Faktor pembatasan adalah jumlah atom substitusi dan bukannya berat atom substitusi. Umumnya, ahli teknik menyatakan komposisi dalam persentase berat. Oleh karena itu perlu kita membiasakan diri merubah persentase berat menjadi persentase atom dan sebaliknya.

Larutan padat tertata Gambar 2.1 memperlihatkan suatu substitusi acak atom dalam struktur kristal lain. Pada larutan demikian, kemungkinan bahwa suatu unsur akan menempati kedudukan atom tertentu dalam kristal sebanding dengan persentase atom unsur tersebut dalam paduan tadi. Dalam keadaan demikian, dikatakan bahwa tidak ada tata substitusi keduaelemen tadi.

Akan tetapi sering dijumpai penataan kedua jenis atom sehingga membentuk pengaturannya khusus. Gambar 2.2. memperlihatkan struktur tertata dimana kebanyakan "atom hitam" dikelilingi oleh atom kelabu" Penataan seperti ini jarang terjadi pada suhu yang lebih tinggi oleh karena agitasi termal yang lebih besar cenderung mengacaukan susunan yang tertata.

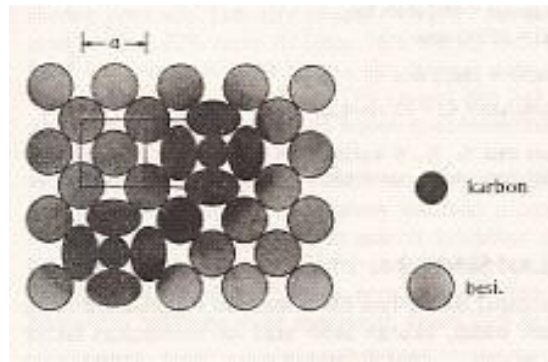
Gambar 2.2. Larutan padat substitusi tertata



Larutan padat interstisi

Jenis larutan padat lainnya, digambarkan pada Gambar 2.3., disisi atom yang kecil dikelilingi oleh atom-atom yang lebih besar. Contoh: karbon dalam besi. Pada suhu dibawah 912°C , besi murni mempunyai struktur kubik pemusatan ruang. Diatas 912°C , terdapat daerah temperatur tertentudimana besi mempunyai struktur kubik pemusatan sisi. Pada kisi kubik pemusatan sisi terdapat ruang sisipan atau "lubang" yang agak besar padapusat sel satuan. Karbon, sebagai atom yang sangat kecil, dapat menduduki

lubang tersebut dan membentuk larutan padat besi dan karbon. Pada suhu yang lebih rendah, dimana besi mempunyai struktur kubik pemusatan ruang, ruang sisipan antara atom-atom besi jauh lebih kecil. Akibatnya, daya larut karbon dalam besi kubik pemusatan ruang sangat terbatas.

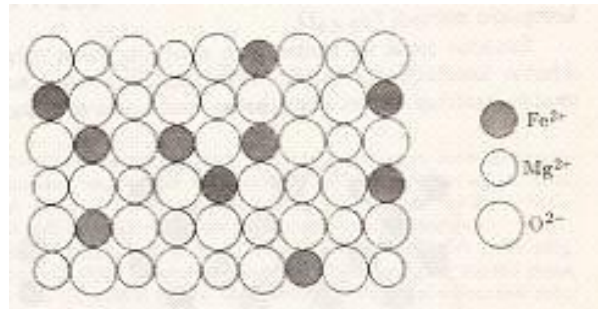


Gambar 2.3 Larutan padat interstisi

Larutan padat dalam senyawa

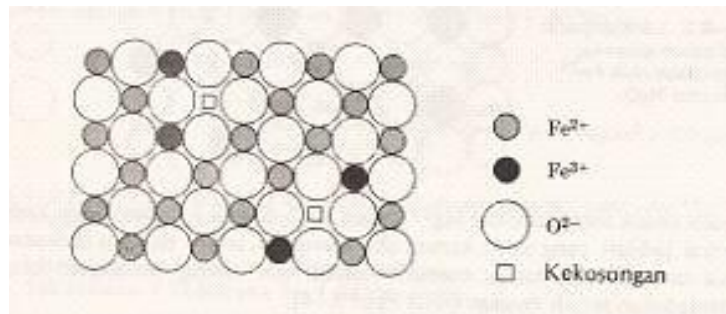
Larutan padat substitusi terdapat dalam fasa ionik maupun logam. Dalam fasa ionik sama halnya dengan logam padat, ukuran atom atau ion merupakan faktor yang penting. Gambar 2.4. adalah contoh larutan padatan ionik. Strukturnya ialah MgO dimana ion Mg^{2+} digantikan oleh ion Fe^{2+} . Karena jari-jari kedua ion tersebut masing-masing 0.066 nm dan 0.074 nm, substitusi sempurna mungkin terjadi. Sebaliknya, ion Ca^{2+} tidak dapat digantikan begitu saja oleh ion Mg^{2+} karena jari-jarinya lebih besar yaitu 0.099 nm.

Persyaratan tambahan yang berlaku lebih ketat untuk larutan padat senyawa keramik daripada larutan padat logam, dengan syarat bahwa muatan valensi ion yang digantikan harus sama dengan muatan valensi ion baru.



Gambar 2.4. Larutan padat substitusi dalam senyawa

Sangat sulit untuk menggantikan Mg^{2+} dalam MgO dengan Li^+ , meskipun keduanya mempunyai jari-jari yang sama karena akan terdapat selisih muatan (kekurangan). Substitusi semacam ini hanya mungkin terjadi bila diiringi perubahan lain yang dapat meniadakan selisih muatan.



Gambar 2.5. Struktur Cacat

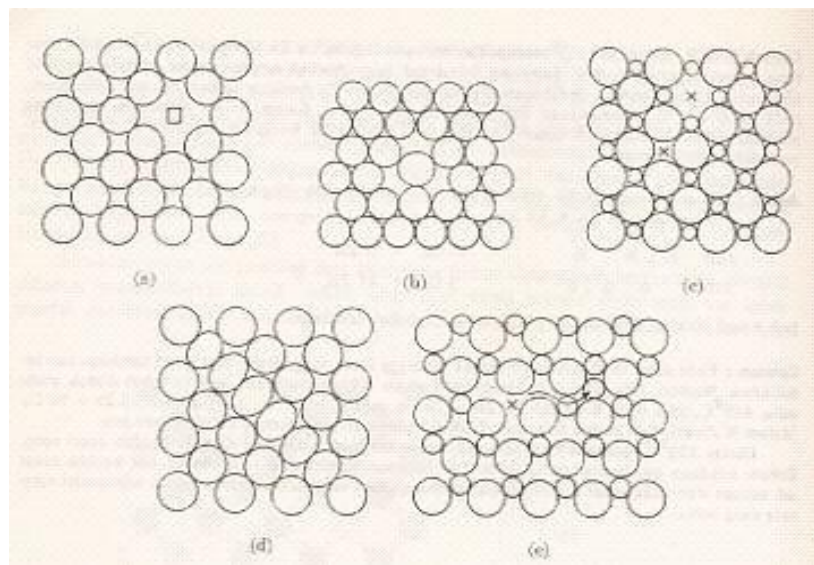
Ketidaksempurnaan dalam Kristal

Telah kita kenal, jenis ketidaksempurnaan dalam kristal, dimana diperlukan kekosongan untuk mengimbangi ~~ke~~ pincangan muatan. Bila ketidaksempurnaan seperti kekosongan meliputi sebuah atau beberapa atom kita sebut: *cacat titik*. Ketidaksempurnaan lain dalam kristal berujud garis; oleh karena itu disebut *cacat garis*. Cacat jenis ini penting pada

waktu kristal mengalami deformasi plastik oleh gaya geser. Sejumlah kecil cacat dapat menyebabkan kristal logam menjadi 1000 kali lebih ulet dibandingkan dengan keadaan tanpa cacat. Bila banyak sekali jumlahnya, cacat garis ini dapat meningkatkan kekuatan logam. Akhirnya, cacat lainnya berbentuk dua dimensi dan mencakup *permukaan luar* atau *batas-batas intern*.

Cacat Titik. Cacat titik yang paling sederhana adalah *kekosongan*, disini ada atom yang "hilang" dalam kristal (Gambar 2.6.). Cacat demikian merupakan hasil dari penumpukkan yang salah sewaktu kristalisasi, atau dapat juga terjadi pada suhu tinggi, oleh karena meningkat energi termal. Bila energi termal tinggi memungkinkan bagi atom-atom untuk melompat meninggalkan tempatnya (dimana energi terendah) akan naik pula.

Gambar 2.6: Cacat titik



- (a) kekosongan
- (b) Kekosongan ganda (dua atom hilang)
- (c) kekosongan pasangan ion (cacat Schottky)
- (d) sisipan
- (e) ion terpisah (cacat Frenkel).

Kekosongan pasangan Ion (disebut juga cacat Schottky) terdapat dalam senyawa yang harus mempunyai keseimbangan muatan, Cacat ini mencakup kekosongan pasangan ion dengan muatan berlawanan. Kekosongan pasangan ion dan kekosongan tunggal mempercepat difusi atom. Suatu atom tambahan dapat berada dalam struktur kristal, khususnya bila faktor tumpukan atom rendah. Cacat semacam ini disebut *sisipan*, mengakibatkan distorsi atom. *Perpindahan Ion* dari kisi ke tempat sisipan disebut cacat Frenkel. Struktur tumpukan padat lebih sedikit sisipan dan ion pindahannya dari pada kekosongan, karena diperlukan energi tambahan untuk menyisipkan atom.

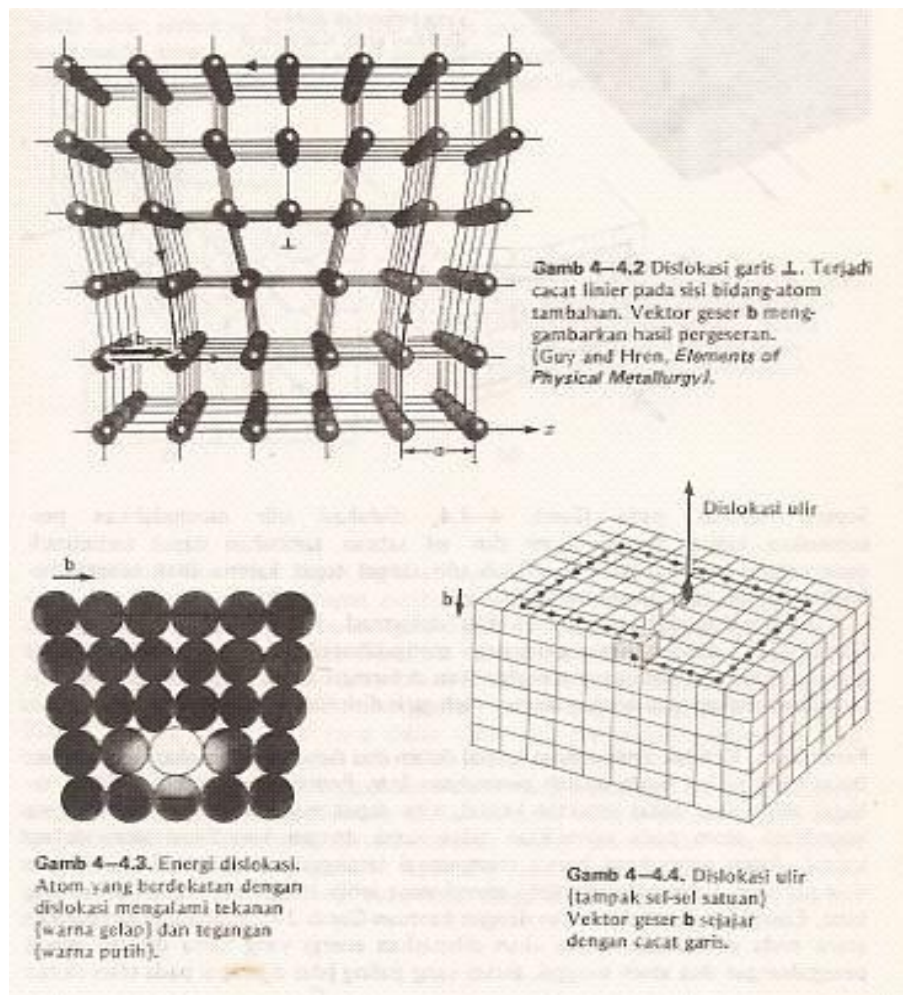
Cacat Garis (Dislokasi) Cacat garis yang paling banyak dijumpai didalam kristal adalah dislokasi. *Dislokasi garis* dapat dilihat pada Gambar 2.7. Dislokasi ini dapat digambarkan sebagai sisipan satu bidang atom tambahan dalam struktur kristal. Disekitar dislokasi garis terdapat daerah yang mengalami tekanan dan tegangan, sehingga terdapat energi tambahan sepanjang dislokasi tersebut. Jarak geser atom disekitar dislokasi disebut vektor geser (b^*). Vektor ini tegak lurus pada garis dislokasi.

Dislokasi ulir menyerupai spiral dengan garis cacat sepanjang sumbu ulir. Vektor gesernya sejajar dengan garis cacat. Atom-atom disekitar dislokasi ulir mengalami gaya geser, oleh karena itu terdapat energi tambahan disekitar dislokasi tersebut.

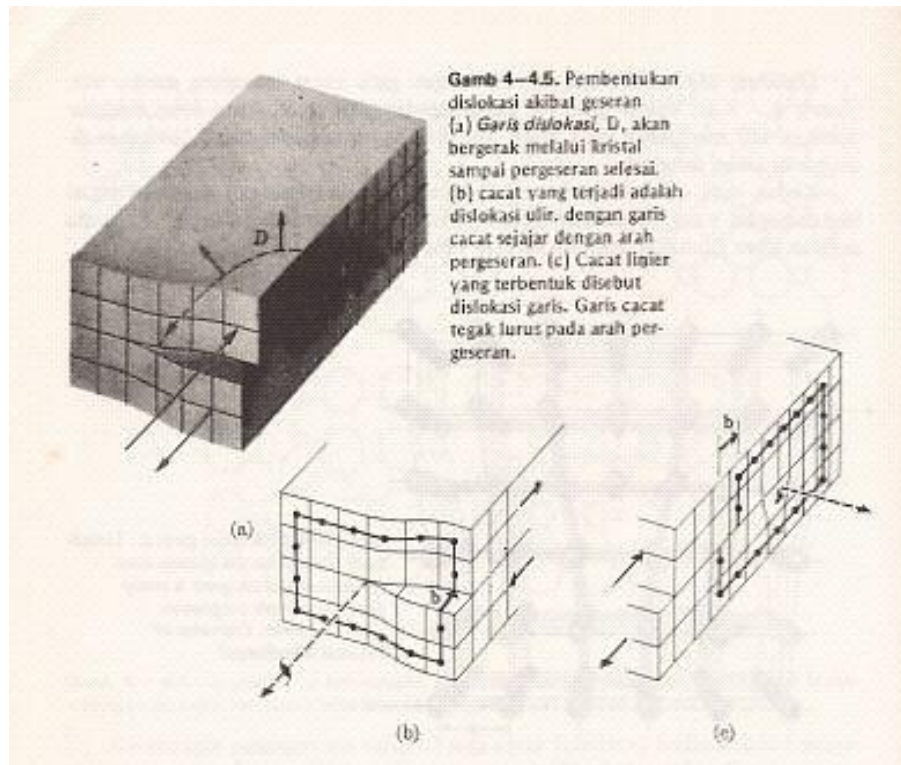
Kedua jenis dislokasi garis terjadi karena ada ketimpangan dalam orientasi bagian-bagian yang berdekatan dalam kristal yang tumbuh sehingga ada suatu deretan atom tambahan ataupun deretan yang kurang.

Seperti terlihat pada Gambar 2.7, dislokasi ulir memudahkan pertumbuhan kristal karena atom dan sel satuan tambahan dapat tertumpuk pada setiap anak tangga ulir. Istilah ulir sangat tepat karena anak tangga melingkari sumbu pada proses pertumbuhan.

Dislokasi mudah terjadi sewaktu deformasi. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.8. dimana suatu pergeseran mengakibatkan terjadinya dislokasi garis dan dislokasi ulir. Keduanya menghasilkan deformasi akhir yang sama dan sebetulnya dihubungkan satu dengan lainnya oleh garis dislokasi yang terjadi.



Gambar 2.7: Dislokasi



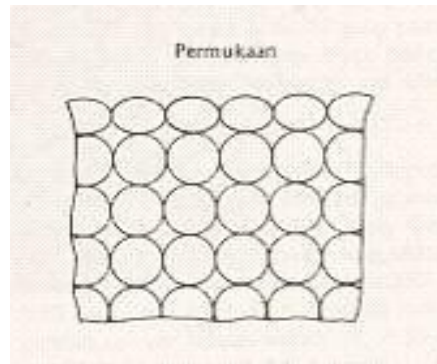
Gambar 2.8.: Pembentukan Dislokasi akibat geseran

Permukaan. Ketidaktepatan kristal dalam dua dimensi merupakan suatu batas. Batas yang paling nyata adalah *permukaan luar*. Permukaan dapat dilukiskan sebagai akhir atau batas struktur kristal, kita dapat memahami kenyataan bahwa koordinasi atom pada permukaan tidak sama dengan koordinasi atom dalam kristal. Atom permukaan hanya mempunyai tetangga pada satu sisi saja, oleh karena itu memiliki energi yang lebih tinggi dan ikatannya kurang kuat.

Batas butir. Meskipun bahan seperti tembaga dalam kawat listrik terdiri dari satu fasa saja, yaitu satu struktur (kps), benda tersebut terdiri dari banyak sekali kristal dengan orientasi yang berbeda. Kristal-kristal ini **disebut butir**. Bentuk butir dalam bahan padat biasanya diatur oleh adanya butir-butir lain disekitarnya. Dalam setiap butir, semua sel satuan teratur

dalam satu arah dan satu pola tertentu. Pada *batas butir*, antara dua butir yang berdekatan terdapat daerah transisi yang tidak searah dengan pola dalam kedua butiran tadi.

Gambar 2.9: Atom Permukaan



Meskipun kita tidak dapat melihat atom-atom itu satu-persatu, dengan mudah kita dapat melihat batas butir dibawah mikroskop. Untuk ini logam perlu *dietsa*. Mula-mula logam dipolis sampai terbentuk permukaan yang halus seperti cermin kemudian diberi zat Kimia tertentu selama beberapa detik. Atom-atom di daerah transisi diantara butiran akan lebih mudah larut dibandingkan atom-atom lainnya dan akan meninggalkan garis yang tampak oleh mikroskop. Batas butir yang *dietsa* tidak lagi merupakan permukaan yang halus sebagai bagian lainnya dari butiran.

Batas butir dapat kita anggap berdimensi dua, bentuknya mungkin melengkung dan sesungguhnya memiliki ketebalan tertentu yaitu 2 sampai 3 jarak atom. Ketidakteraturan orientasi antara butiran yang berdekatan menghasilkan tumpukan atom yang kurang efisien sepanjang batas. Oleh karena itu atom sepanjang batas butir memiliki energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang terdapat dalam butir.

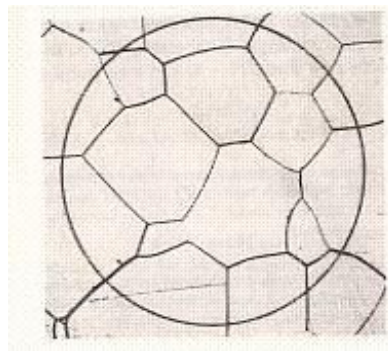
Hal ini yang menyebabkan mengapa daerah perbatasan lebih mudah terkikis. Energi atom batas butir yang lebih tinggi juga penting bagi proses nukleasi selama perubahan fasa polimorfi. Tumpukan atom yang lebih

sedikit, pada batas butir memperlancar difusi atom, dan ketidakseragaman orientasi pada butir yang berdekatan mempengaruhi kecepatan gerak dislokasi, jadi batas butir merubah regangan plastik dalam bahan

Daerah batas butir dan besar butir.

Karena batas butir berpengaruh atas bahan dalam berbagai hal, perlu diketahui besar daerah batas butir per satuan volum (S_v). Besarnya dapat dihitung dengan mudah dengan menarik suatu garis pada gambar strukturmikro. Garis ini akan memotong lebih banyak batas butir pada bahan *berbutir halus* dibandingkan dengan bahan *berbutir kasar*. Hubungannya adalah $S_v = 2 P_L$, dimana P_L merupakan jumlah titik potong antara garis dengan panjang satuan dan batas butir. Hubungan tersebut diatas tidak akan dibuktikan disini, akan tetapi kebenarannya dapat dilihat pada Gambar 1.22.

Gambar 2.10: Menghitung daerah batas butir

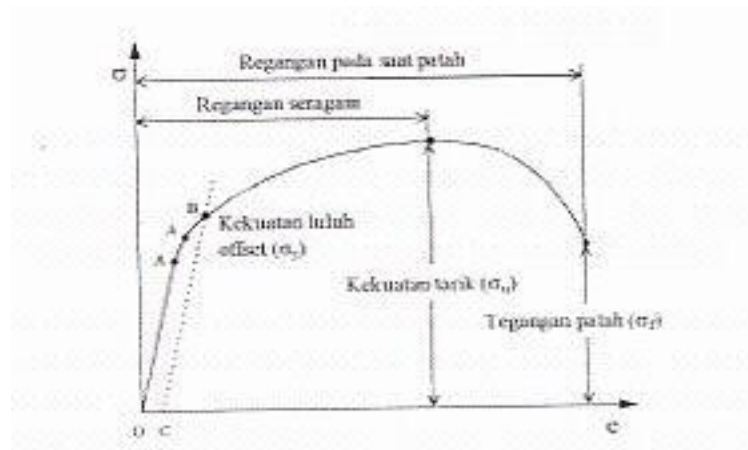


BAB.3. DEFORMASI DAN REKRISTALISASI

3.1. Deformasi

3.1.1. Pengertian Deformasi Elastis dan Deformasi Plastis

Deformasi atau perubahan bentuk dapat dipisahkan menjadi dua, yaitu deformasi elastis dan deformasi plastis. Deformasi elastis adalah perubahan bentuk yang bersifat sementara. Perubahan akan hilang bila gaya dihilangkan. Dengan kata lain bila beban ditiadakan, maka benda akan kembali ke bentuk dan ukuran semula. Di lain pihak, deformasi plastis adalah perubahan bentuk yang bersifat permanen, meskipun beban dihilangkan



Gambar 3.1: Kurva tegangan-regangan suatu material

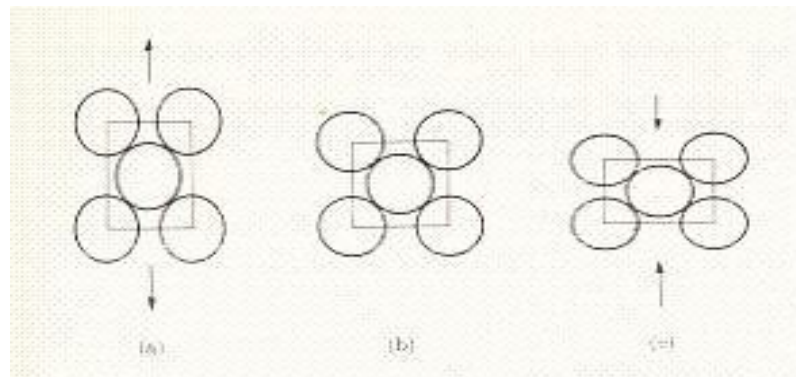
Bila suatu material dibebani sampai daerah plastis, maka perubahan bentuk yang saat itu terjadi adalah gabungan antara deformasi elastis dan deformasi plastis (penjumlahan ini sering disebut deformasi total). Bila beban ditiadakan, maka deformasi elastis akan hilang pula, sehingga perubahan bentuk yang ada hanyalah deformasi plastis saja.

Deformasi Elastik

Deformasi elastik terjadi bila sepotong logam atau bahan padat dibebani gaya. Bila beban berupa gaya tarik, benda akan bertambah panjang; setelah gaya ditiadakan, benda akan kembali ke bentuk semula. Sebaliknya, beban berupa gaya tekan akan mengakibatkan benda menjadi pendek sedikit. Regangan elastik adalah hasil dari perpanjangan sel satuan dalam arah tegangan tarik, atau kontraksi dari sel satuan dalam arah tekanan.

Bila hanya ada deformasi elastis, regangan akan sebanding dengan tegangan. Perbandingan antara tegangan dan regangan disebut **modulus elastisitas** (modulus Young), dan merupakan karakteristik suatu logam tertentu. Makin besar gaya tarik menarik antar atom logam, makin tinggi pula modulus elastisitasnya.

Setiap perpanjangan atau perpendekan struktur kristal dalam satu arah tertentu, karena gaya searah, akan menghasilkan perubahan dimensi dalam arah tegak lurus dengan gaya tadi.



Gambar 3.2: Kurva tegangan-regangan suatu material

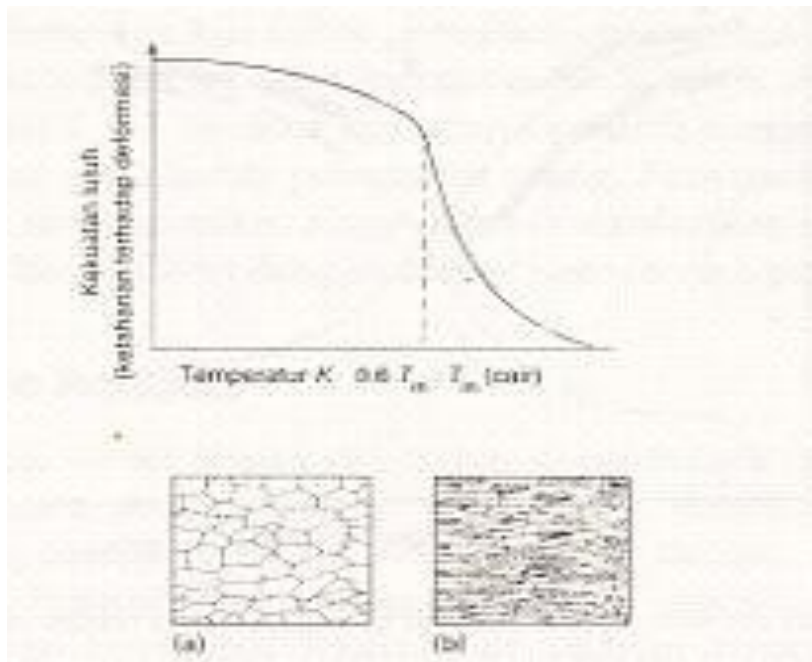
Deformasi Plastik

Pada deformasi plastik terjadi bila sepotong logam atau bahan padat dibebani gaya. Logam akan mengalami perubahan bentuk, dan setelah gaya

ditiadakan, terjadi perubahan bentuk permanen. Hal ini terjadi akibat sliding antar bidang atom, dan atau ikatan atom-atomnya pecah

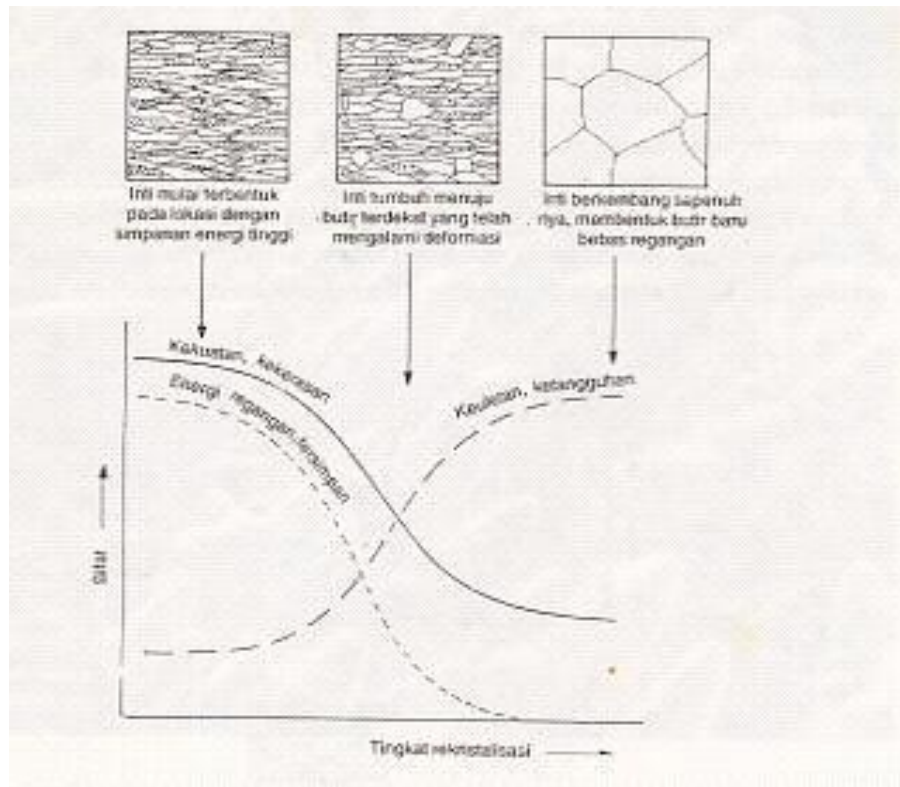
3.2.Rekristalisasi

Energi yang terhimpun dalam struktur pengerjaan dingin menjadikan logam tidak stabil. Bila dipanaskan hingga suhu yang menyebabkan difusi berlangsung dengan cepat, rangkaian dislokasi terlepas dan terbentuk batas butir baru. Logam menjadi lunak dan dikatakan bahwa logam telah dianil. Inti untuk butir baru terdapat di lokasi di dalam butir kristal yang rusak. Daerah tersebut kemudian tumbuh, sehingga terjadi kristal baru bebas regangan. Proses disebut **rekristalisasi**. Makin besar jumlah energi yang tersimpan dengan perkataan lain, pengerjaan dingin logam lebih besar semakin besar jumlah lokasi inti makin halus butir akhir.



Gambar 3.3.: Perubahan butir setelah dianil

Seperti telah diperlihatkan pada Gambar 4.2., sifat bahan yang dianil berubah menjadi sifat keadaan bebas regangan, meskipun kekuatan dan keuletan meningkat (dibandingkan dengan benda coran). Sesungguhnya, proses rekristalisasi tidak semudah itu. Terdapat tahap antara yang tidak dapat diamati dengan mikroskop optik. Pada tahap ini rangkaian dislokasi membentuk batas butir bersudut kecil, dan disebut tahap pemulihan. Meskipun sifat mekanik hampir tak berubah, tetapi terjadi pengaturan kembali struktur pada skala atom, mendahului perubahan struktur mikro di atas.



Gambar 3.4: Perubahan struktur mikro dan sifat mekanik logam Terdeformasi selama proses rekristalisasi

Temperatur rekristalisasi biasanya sekitar $0.4 - 0.6 T_m$. Proses rekristalisasi bergantung pada waktu dan temperatur, biasanya dipilih suhu sekitar $0.6 T_m$ agar proses berlangsung lebih cepat. Pengerjaan mekanik mempunyai efek yang sangat berbeda bila dilakukan di atas atau di bawah daerah rekristalisasi. Bila di bawah suhu rekristalisasi, struktur yang dihasilkan terdistorsi, mengandung energi, dan disebut struktur pengerjaan dingin.

Bila deformasi dilakukan di atas suhu rekristalisasi, struktur yang dihasilkan lebih lunak, mempunyai sifat mekanik yang sama dengan logam awal, dan disebut struktur pengerjaan panas. Perlu dicatat bahwa istilah "panas" atau "dingin" berkaitan suhu kerja yang dihubungkan dengan $0.6 T_m$ atau suhu rekristalisasi. Sebagai contoh untuk timbal (Pb) pengerjaan pada suhu ruang termasuk pengerjaan panas, sedang untuk tungsten (W) 1000°C masih merupakan pengerjaan dingin.

Rekristalisasi logam pengerjaan dingin belum tentu menghasilkan produk akhir yang stabil. Bila logam dipanaskan terus setelah proses rekristalisasi berakhir, butir yang besar akan "memakan" butir yang kecil sehingga batas butir keseluruhan sistem berkurang. Dengan pengerjaan dingin sebesar 2 – 5 % diperoleh beberapa daerah berenergi regangan tinggi, yang kemudian menjadi inti. Setelah proses anil pada $0.8 T_m$ tumbuh butir berdiameter beberapa cm. Meskipun percobaan ini bermanfaat untuk memperlihatkan jalannya proses rekristalisasi, secara teknis kurang bermanfaat. Tujuan anil adalah untuk menuntaskan proses rekristalisasi. Pertumbuhan butir ditekan untuk mencapai kekuatan optimal, kekuatan juga meningkat bila butir tetapanalus.

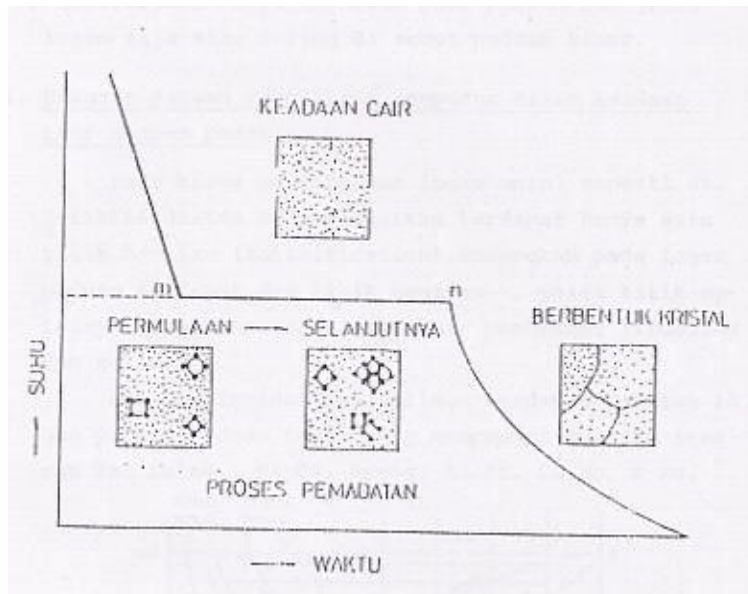
BAB.4. TRANSFORMASI FASA

4.1. Kurva Pendinginan Logam Murni

Logam murni dalam keadaan cair, atom-atomnya memiliki gaya tarik menarik yang lemah dan tersusun secara random. Jika logam cair tersebut dibiarkan mendingin maka pada temperatur tertentu logam tersebut akan membeku. Perubahan keadaan dari cair ke padat berlangsung pada temperatur pembekuan, dan proses pembekuan ini disebut *solidification*. Panas yang dilepaskan selama pembekuan ini disebut panas laten. Logam dalam keadaan padat memiliki tingkat energi yang lebih rendah dari pada dalam keadaan cair, sehingga atom-atom logam tersebut memiliki energi yang kurang untuk dapat bergerak/mengalir.

Selama pembekuan atom-atom menyusun dirinya secara teratur dan berulang ulang dengan gaya ikatan yang kuat membentuk logam padat. Dibawah ini ditunjukkan contoh curva pendinginan dari logam murni. Kurva pendinginan tidaklah selalu sederhana seperti yang terlihat pada gambar 6.1. Misalnya untuk pendinginan besi murni ternyata lebih rumit (Gambar 6.2).

Untuk besi murni (Fe) pada temperatur 1535°C sudah terjadi pembekuan tetapi pada temperatur yang lebih rendah lagi masih terdapat titik hentian yang lain, yakni pada temperatur 1390°C , 910°C dan 768°C . Hal ini adalah disebabkan masih terdapatnya perubahan struktur dari besi yang sudah membeku tersebut, dan dengan adanya perubahan struktur ini dikenal 3 jenis besi yakni besi α / β ; besi γ dan besi δ . Sebenarnya besi α dan besi β mempunyai struktur yang sama, hanya terdapat sedikit perbedaan sifat magnetisnya.



Gambar 4.1: Kurva pendingin logam murni.

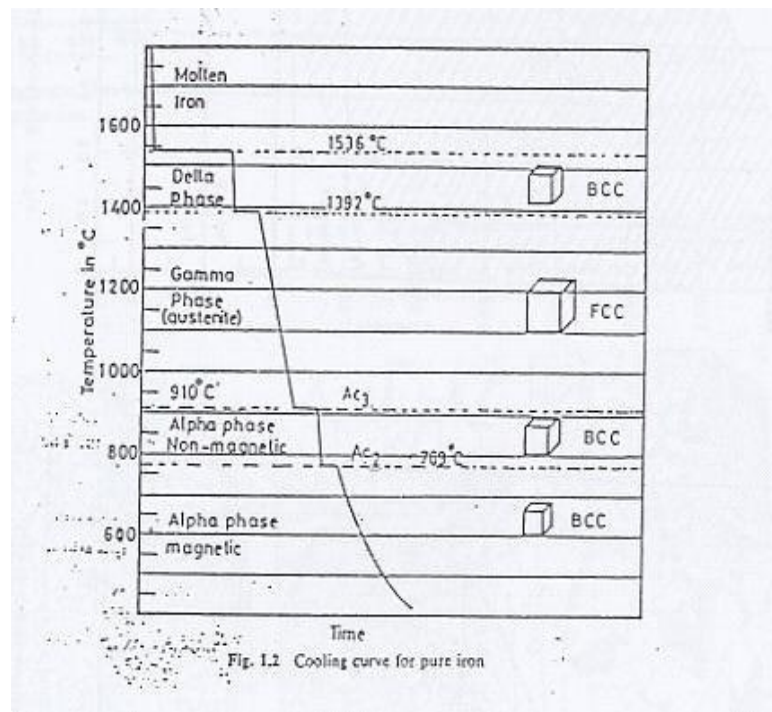


Fig. 1.2 Cooling curve for pure iron

gambar 4.2: Kurva pendingin besi murni

4.2. Diagram Paduan

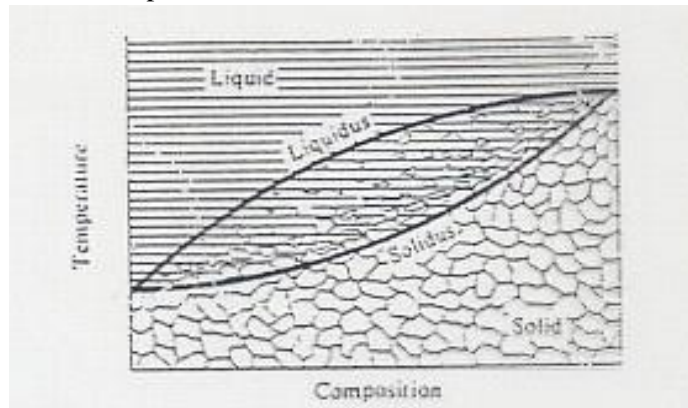
Pada pembahasan yang berikut ini paduan yang dibicarakan hanya terbatas pada paduan dua jenis logam saja atau sering disebut paduan biner.

4.2.1. Diagram paduan yang larut sempurna

Pada kurva pendingin logam murni seperti dijelaskan di atas memperlihatkan terdapat hanya satu titik hentian (solidification). Sedangkan pada logam paduan terdapat dua titik hentian, yaitu titik mulainya pembekuan (liquidus dan solidus).

Antara liquidus dan solidus terdapat larutan logam padat. Paduan logam yang mempunyai diagram semacam ini ialah : Ni-Cu, Au-Ag, Au-Pt, Cr-Mo, W-Mo.

gambar 4.3: Diagram zat larut sempurna



Sebagai contoh pembacaan diagram diatas : suatu paduan dengan komposisi x %, pada temperatur T₂. Paduan terdiri dari bagian cair dan bagian padat. Untuk mendapatkan perbandingan bagian padat dan bagian cair pada temperatur T₂ ini ditarik garis mendatar yaitu garis isothermal (teiline) dan dengan menggunakan azas (lever: rule) diperoleh :

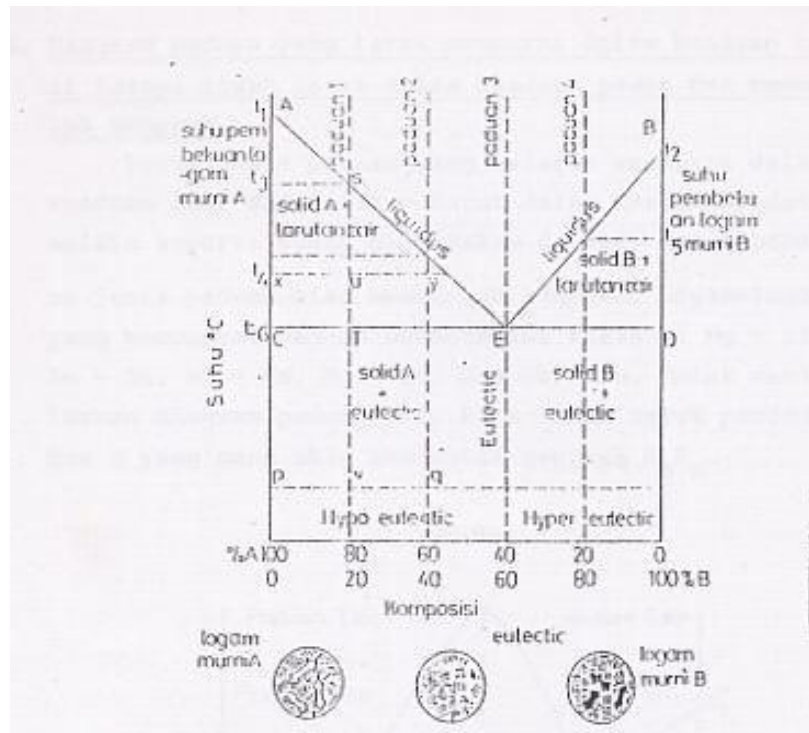
$$\frac{\text{Berat bagian padat}}{\text{bagian cair}} = \frac{CE}{ED} = \text{Berat}$$

Proses pembekuan paduan dengan komposisi x ini berlangsung sebagai berikut : pembekuan dimulai pada suhu T1 dan pada penurunan temperatur selanjutnya bagian yang padat semakin meningkat dan bagian yang cair semakin berkurang, akhirnya pada temperatur T3 paduan sudah membeku seluruhnya. Paduan padat yang diperoleh, seluruhnya mempunyai komposisi x %.

4.2.2. Diagram paduan yang tak dapat larut dalam keadaan padat

Sebagaimana halnya pada jenis paduan yang terdahulu, pada jenis paduan ini juga ditemui garis liquidus. Tetapi pada keadaan tertentu untuk jenis paduan semacam ini ditemukan suatu titik eutectic yaitu suatu keadaan (pada komposisi tertentu) paduan dari keadaan cair langsung berubah menjadi padat. Logam-logam yang mempunyai paduan semacam ini adalah: Pb - Sb; Al - Si ; Au - Si, dan Sn - Zn.

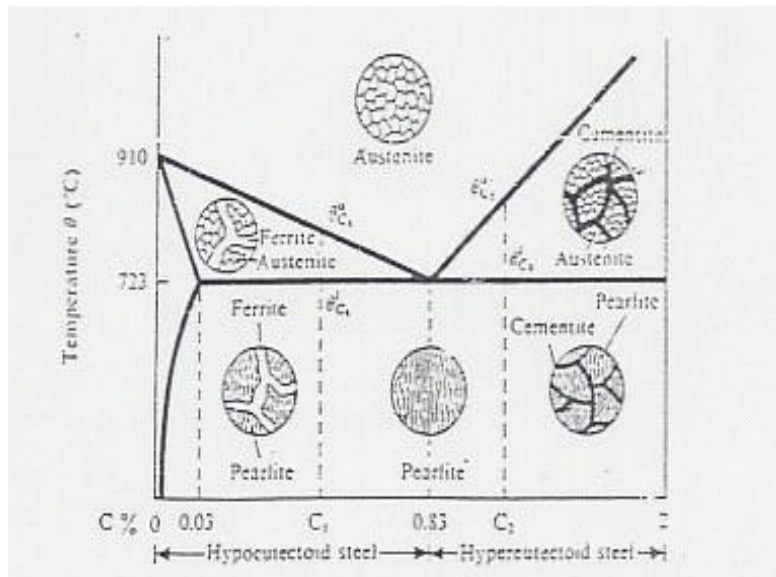
Dibawah ini diberikan bentuk diagram fasa untuk jenis paduan ini. (lihat gambar 1.30). Untuk menjelaskan proses berlangsungnya pembekuan kita ambil contoh dibawah ini. Untuk paduan logam A & B pada gambar 6.4 dengan komposisi 80% logam A dan 20% logam B.



Gambar 4.4 : Diagram paduan yang tidak dapat larut dalam keadaan padat.

4.2.3. Diagram paduan yang tak dapat larut dalam keadaan padat dan membentuk senyawa

Untuk jenis paduan yang melarut sempurna dalam keadaan cair dan tidak melarut dalam keadaan padat, selain seperti sudah dijelaskan diatas, dalam beberapa jenis paduan bisa membentuk senyawa. Logam-logam yang mempunyai paduan semacam ini adalah : Mg - Si, Au - Bi, Mg - Sn, Mg - Pb, dan Co - Sb. Untuk menjelaskan diagram paduan ini, kita lihat untuk paduan A dan B yang mana akan membentuk senyawa $AmBn$.



Gambar 4.5 : Diagram paduan yang tak dapat larut dalam keadaan padat dan membentuk senyawa.

Senyawa AmBn merupakan suatu komponen yang berdiri sendiri pada diagram dan mempunyai suatu titik cair yang mungkin lebih tinggi atau lebih rendah dari titik cair logam murni asalnya (logam murni A dan B), diagram paduan jenis ini meliputi dua sistim yaitu :

- (1) A – AmBn dan
- (2) AmBn - B.

Masing-masing sistem ini adalah merupakan tipe dari diagram pembekuan yang sudah dijelaskan pada halaman terdahulu. Pada sistim A – AmBn permulaan pembekuan ditunjukkan oleh garis A1 E1 C1. Pemisahan logam murni A memadat, dari cairan berlangsung sepanjang garis A1E1 dan sepanjang garis E1C1. Akhir pembekuan paduan terjadi pada sepanjang garis suhu eutectic D1 E1 F1.

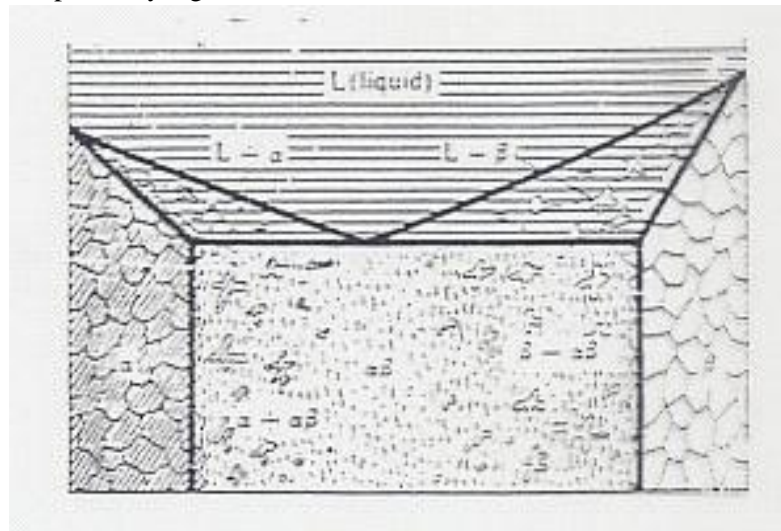
Kristal A dan AmBn terpisah secara serentak dari cairan pada titik E1, Campuran ini mempunyai komposisi eutectic. Pada paduan sistim AmBn -B, pembekuan mulai sepanjang garis C1 E2 B1. Senyawa Am Bn terpisah

sepanjang garis C1 E2 dan logam murni B padat terpisah sepanjang garis E2 B1. Paduan akan membeku secara keseluruhan pada suhu eutectic (garis KE2 L1). Paduan eutectic ditunjukkan oleh titik E2 yang terdiri dari $A_m B_n + B$.

4.2.4. Diagram paduan yang larut terbatas dalam keadaan padat

Dalam paduan ada juga ditemukan komponen yang larut sempurna dalam keadaan cair tetapi hanya dapat larut sebagian dalam keadaan padat. Logam-logam yang mempunyai paduan seperti ini ialah Cu - Sn, Cu - Zn, Cu - Be, Cu - Al, Cu - Ag, Al - Mg, dan Pb - Sn. Pada paduan semacam ini dihasilkan dua tipe diagram fasa yaitu tipe eutectic dan tipe peritectic.

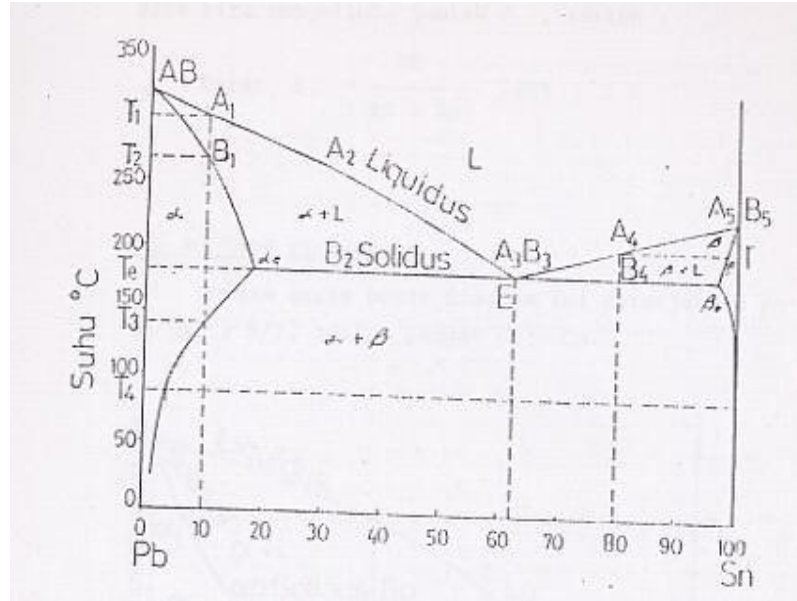
Gambar 4.6 : Diagram paduan yang larut terbatas



Tipe Eutectic.

Jika diperhatikan diagram paduan Pb - Sn dibawah titik eutectic berada $\alpha_p = \beta_p$ pada temperatur $180^{\circ}C$. Temperatur pada bagian garis solidus yang

mendatar disebut temperatur eutectic. Komposisi pada perpotongan antaragaris solidus dan liquidus adalah komposisi eutectic (C_e).



Gambar 4.7 : Diagram paduan yang larut terbatas dalam keadaan padat Tipe eutectic

Bila kita perhatikan paduan dengan 90% Pb dan 10%Sn, disini paduan mengandung lebih sedikit Sn bila dibanding Pb. Proses pembekuan pada konsentrasi ini mempunyai kesamaan dengan paduan yang larut sempurnadalam keadaan padat. Pembekuan dimulai pada temperatur T1 dan berakhir pada T2, sehingga didapatkan larutan padat. Batas kelarutan Sn dalam Pb ini dicapai pada temperatur T3, tetapi setelah temperatur T3 turun mulai terbentuk larutan padat β , dan sehingga pada temperatur T4 terjadi larutan padat $\alpha + \beta$. Perbandingan α dan β ini dapat dihitung dengan rumus leverrule :

$$\frac{\text{Berat } \alpha}{\text{Berat } \beta} = \frac{AB}{AE}$$

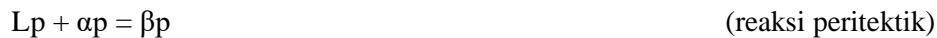
jika kita menghitung jumlah β , adalah

$$\text{Berat } \beta = \frac{AE}{AE + AB}$$

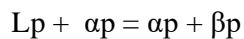
Tipe Peritectic.

Secara garis besar diagram ini ditunjukkan pada gambar 1.34, pada paduan Co – Cu, sama halnya dengan diagram tipe eutectic, diagram ini mempunyai garis solidus pada temperatur peritectic T_p . Proses pembekuan paduan pada konsentrasi paduan 100% Co sampai α_p mempunyai kesamaan dengan diagram paduan tipe eutectic pada konsentrasi 100% Pb sampai α_e . Proses pembekuan paduan pada konsentrasi L_p sampai 100% Cu mempunyai kesamaan dengan diagram larut semua dalam keadaan padat.

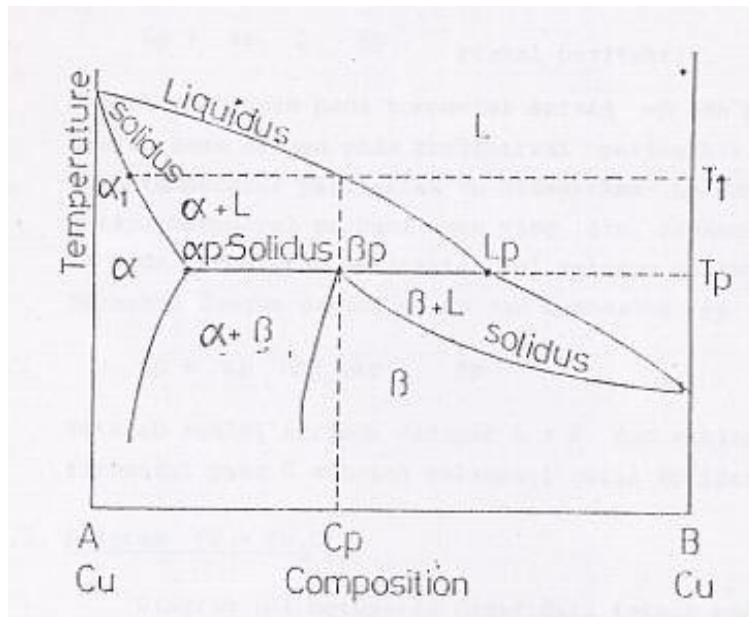
Hal yang baru disini adalah pada komposisi β_p dan L_p . Bila kita tinjau pada suatu paduan dengan komposisi peritectic C_p , pembekuan terjadi pada T_1 dan dihasilkan fase α dengan komposisi α_1 , setelah temperatur pembekuan mencapai T_p , maka dicapai komposisi α_p dan tertinggal cairan dengan komposisi L_p . Pada temperatur peritectic ini seluruh cairan bereaksi dengan α_p untuk membentuk β dengan komposisi C_p .



Pembekuan paduan pada komposisi antara α_p dan β_p adalah sama dengan pada konsentrasi peritektik. Pada temperatur peritektik T_p didapatkan L_p dan α_p tetapi mempunyai perbandingan yang lain, dan kemudian pada temperatur peritektik ini seluruh cairan bereaksi dengan sebahagian α_p dan membentuk β_p .



Setelah reaksi terjadi didapat $L + \beta$ dan akhirnya terbentuk fase β setelah melampaui garis solidus.



Gambar 4.8 : Diagram paduan yang larut terbatas dalam keadaan padat tipe peritectic

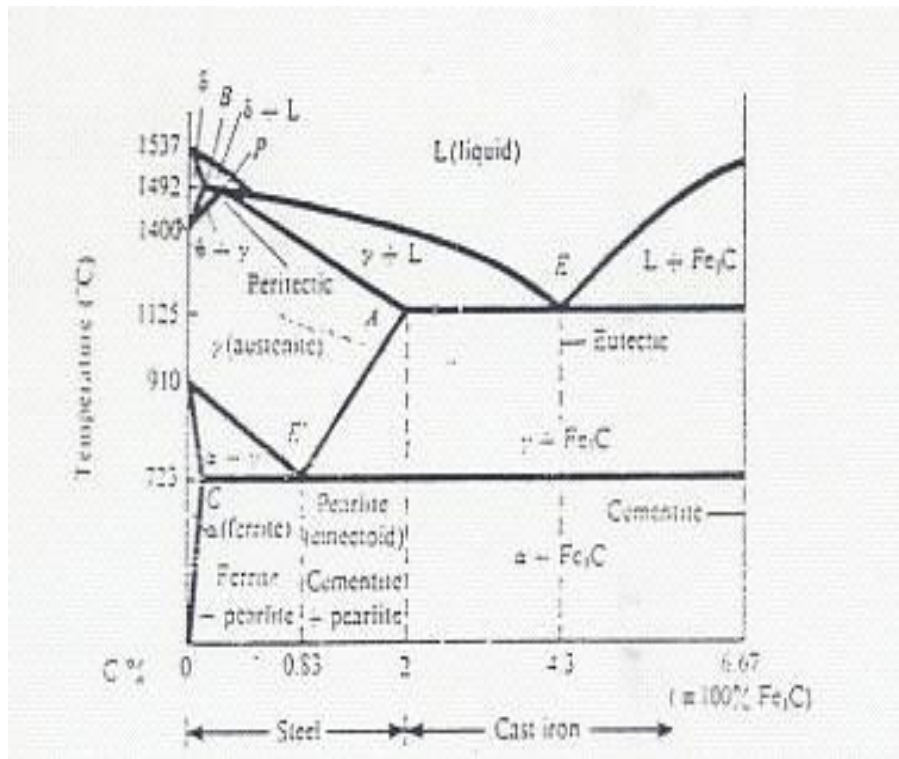
BAB.V.DIAGRAM BESI – BESI KARBIDA

5.1.Diagram Besi – Karbon

Kegunaan baja sangat bergantung dari pada sifat – sifat baja yang sangat bervariasi yang diperoleh dari pemaduan dan penerapan proses perlakuan panas. Sifat mekanik dari baja sangat bergantung pada struktur mikronya. Sedangkan struktur mikro sangat mudah dirubah melalui proses perlakuan panas. Baja adalah paduan besi dengan kandungan karbon sampai maksimum sekitar 1,7% . Paduan besi dengan karbon di atas 1,7% disebut dengan besi cor (cast iron)

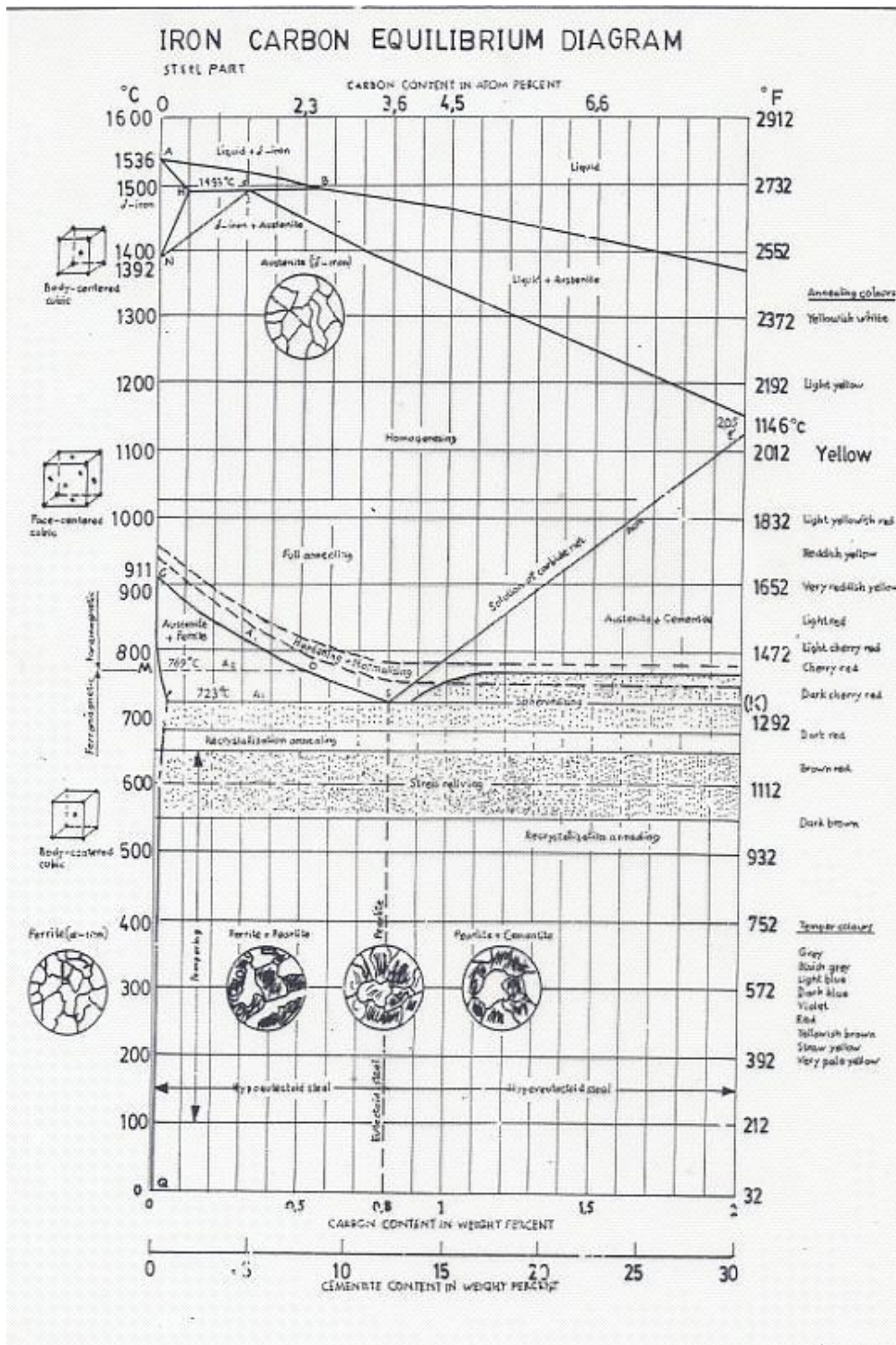
Beberapa jenis baja memiliki sifat – sifat yang tertentu sebagaimana akibat penambahan unsur paduan. Salah satu unsur paduan yang sangat penting yang dapat mengontrol sifat baja adalah karbon (C). jika besi dipadu dengan karbon, transformasi yang terjadi pada rentang temperatur tertentu erat kaitannya dengan kandungan karbon. Diagram yang menggambarkan hubungan antara temperatur dimana terjadinya perubahan fasa selama proses pendinginan dan pemanasan yang lambat dengan kadar karbon disebut dengan diagram fasa. Diagram ini merupakan dasar pemahaman untuk semua operasi – operasi Perlakuan Panas seperti diperlihatkan pada gambar 7.1.

Diagram ini merupakan dasar dari teknik paduan besi (baja & besi tuang). Sementit (Fe_3C) terdiri dari 6,67 % terbentuk dari laju pendinginan yang cepat, jika laju pendinginan lambat maka akan terbentuk karbon (grafit) yang terpisah. Struktur kristal sementit adalah orthorombic.



Gambar 5.1: Diagram Fe – Fe₃C

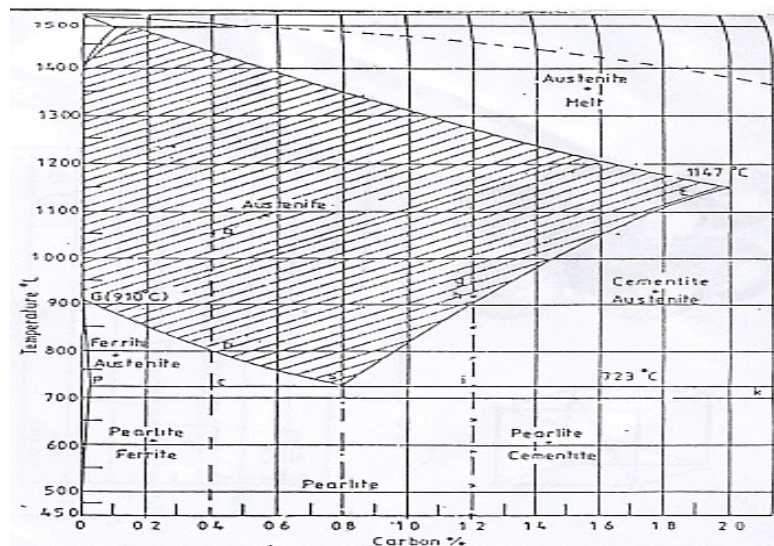
Diagram keseimbangan besi - zat arang ditunjukkan oleh garis putus-putus pada diagram phase Fe - Fe₃C. Grafit lebih stabil dari Fe₃C. Maka diagram Fe - Fe₃C dapat dianggap sebagai suatu diagram phase yang metastabil. Kebanyakan baja hanya mengandung besi karbid dan bukan grafit, sehingga dalam pemakaian diagram Fe - Fe₃C sangat penting.



Gambar 5.2: Diagram Besi – Besi Karbida

Karbon adalah unsur penstabil austenit. Kelarutan maksimum dari karbon pada austenit adalah sekitar 1,7% pada suhu 1140°C sedangkan kelarutan karbon pada ferit naik dari 0% pada 910°C menjadi 0,025% pada 723°C. Pada pendinginan lanjut, kelarutan karbon pada ferit menurun menjadi 0,008% pada temperatur kamar.

Pada gambar 7.3 garis GS tampak bahwa jika kadar karbon meningkat maka transformasi austenit jadi ferit akan menurun dan akan mencapai pada titik S yaitu pada saat prosentase karbon mencapai 0,8% pada temperatur 723°C. titik ini biasa disebut sebagai titik eutektoid. Komposisi eutektoid dari baja merupakan titik rujukan untuk mengklasifikasikan baja. Baja dengan karbon 0,8% disebut baja eutektoid sedangkan baja dengan karbon kurang dari 0,8% disebut baja hypoeutektoid. Hypereutektoid adalah baja dengan kandungan karbon lebih dari 0,8%.



Gambar 5.3: Fasa pada baja eutektoid pada diagram fasa.

Titik kritis sepanjang garis GS disebut sebagai garis A_3 sedangkan titik kritis sepanjang garis PSK disebut sebagai garis A_1 . dengan demikian setiap

titik pada garis GS dan SE menyatakan temperatur dimana transformasi dari austenit dimulai baik pada saat dipanaskan atau didinginkan.

5.2. Struktur Mikro dan Kaitannya dengan Sifat Mekanik

Baja dapat dilakupanas agar diperoleh struktur mikro dan sifat yang diinginkan. Struktur mikro dan sifat yang diinginkan tersebut dapat diperoleh melalui proses pemanasan dan pendinginan pada temperatur tertentu. Jika permukaan dari suatu spesimen baja disiapkan dengan cermat dan struktur mikronya diamati dengan menggunakan mikroskop, maka akan tampak bahwa baja tersebut memiliki struktur yang berbeda-beda. Jenis struktur yang ada sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia dari bajad dan jenis perlakuan panas yang diterapkan pada baja tersebut. Struktur yang akan ada pada suatu baja adalah ferit, Perlit, bainit, martensit, sementit dan karbida lainnya.

FERIT :

Larutan padat karbon dan unsur paduan lainnya pada besi kubus pusat badan ($Fe\alpha$) disebut ferit. Ferit terbentuk pada proses Pendinginan yang lambat dari austenit baja hipoeutektoid pada saat mencapai A_3 . Ferit bersifat sangat lunak, ulet dan memiliki kekerasan sekitar 70 - 100 BHN dan memiliki konduktivitas yang tinggi.

Jika austenit didinginkan di bawah A_3 , austenit yang memiliki kadar C yang sangat rendah akan bertransformasi ke Ferit (yang memiliki kelarutan C maksimum sekitar 0,025 % pada temperatur $723^{\circ}C$).

PERLIT :

Perlit adalah campuran sementit dan ferit yang memiliki kekerasan sekitar 10-30 HRC. Jika baja eutektoid (0,8% C) diaustenisasi dan didinginkan dengan cepat ke suatu temperatur dibawah A₁, misalnya ke temperatur 700⁰C dan dibiarkan pada temperatur tersebut sehingga terjadi transformasi isothermal, maka austenit akan mengurai dan membentuk perlit melalui proses pengintian (nukleasi) dan pertumbuhan. Perlit yang terbentuk berupa campuran ferit dengan sementit yang tampak seperti pelat-pelat yang tersusun bergantian.

Perlit yang terbentuk sedikit dibawah temperatur eutektoid memiliki kekerasan yang lebih rendah dan memerlukan waktu inkubasi yang lebih banyak. Penurunan temperatur lebih lanjut waktu inkubasi yang diperlukan untuk transformasi ke perlit makin pendek dan kekerasan yang dimiliki oleh Perlit lebih tinggi. Pada baja hipoeutektoid (kadar karbonnya kurang dari 0,8%) struktur mikro baja akan terdiri dari daerah-daerah perlit yang dikelilingi oleh ferit. Sedangkan pada baja hipereutektoid (kadar karbonnya lebih dari 0,8%), pada saat didinginkan dari austenitnya, sejumlah sementit proeutektoid akan terbentuk sebelum perlit dan tumbuh di bekas batas butir austenit.

BAINIT :

Bainit adalah suatu fasa yang diberi nama sesuai dengan nama penemunya yaitu E.C. Bain. Bainit merupakan fasa yang kurang stabil (metastabil) yang diperoleh dari austenit pada temperatur yang lebih rendah dari temperatur transformasi ke perlit dan lebih tinggi dari temperatur transformasi ke Martensit. Sebagai contoh jika baja eutektoid yang diaustenisasi didinginkan dengan cepat ke temperatur sekitar 250 - 500⁰C dan dibiarkan pada temperatur tersebut, hasil transformasinya adalah berupa struktur yang terdiri dari ferit dan sementit tetapi bukan perlit.

Struktur tersebut dinamai Bainit. Kekerasannya bervariasi antara 45-55 HRC tergantung pada temperatur transformasinya. Ditinjau dari temperatur transformasinya, jika terbentuk pada temperatur yang relatif tinggi disebut Upper Bainite sedangkan jika terbentuk pada temperatur yang lebih rendah disebut sebagai Lower Bainite. Struktur upper bainite seperti perlit yang sangat halus sedangkan lower bainite menyerupai martensit temper.

MARTENSIT :

Martensit adalah fasa yang ditemukan oleh seorang metalografer yang bernama A. Martens. Fasa tersebut merupakan larutan padat dari karbon yang lewat jenuh pada besi alfa sehingga latis-latis sel satuannya terdistorsi. Sifatnya sangat keras dan diperoleh jika baja dari temperatur austenitnya didinginkan dengan laju pendinginan yang lebih besar dari laju pendinginan kritisnya.

Dalam paduan besi karbon dan baja, austenit merupakan fasa induk dan bertransformasi menjadi martensit pada saat pendinginan. Transformasi kemartensit berlangsung tanpa difusi sehingga komposisi yang dimiliki oleh martensit sama dengan komposisi austenit, sesuai dengan komposisi paduannya sel satuan martensit adalah Tetragonal pusat badan (Body center tetragonal/BCT). Atom karbon dianggap menggeser latis kubus menjadi tetragonal. Kelarutan karbon dalam BCC menjadi lebih besar jika terbentuk martensit, dan hal inilah yang menyebabkan timbulnya tetragonalitas (BCT). Makin tinggi konsentrasi karbon, makin banyak posisi interstisi yang tersisih sehingga efek tetragonalitasnya makin besar.

Pembentukan martensit berbeda dengan pembentukan perlit dan bainit, dan secara umum tidak tergantung pada waktu. Dari diagram transformasi, terlihat martensit mulai terbentuk pada temperatur M_s . Jika pendinginan dilanjutkan, akan bertransformasi ke martensit. Makin rendah temperaturnya, makin banyak austenit yang bertransformasi ke martensit

dan pada titik M_f pembentukan martensit berakhir. Pada contoh ini, martensit mulai terbentuk pada temperatur sekitar 200°C (M_s) berakhir pada temperatur sekitar 29°C yaitu pada saat martensit hampir mencapai 100%. Bahwa pembentukan martensit tidak tergantung pada waktu dijelaskan dengan adanya garis horisontal pada diagram TTT/CCT. Pada 100°C sekitar 90% martensit telah terbentuk dan perbandingan ini tidak akan berubah terhadap waktu sepanjang temperaturnya konstan.

Awal dan akhir dari pembentukan martensit sangat tergantung pada komposisi kimia dari baja dan cara mengaustenisasi. Pada baja karbon, temperatur awal dan akhir dari pembentukan martensit (M_s dan M_f) sangat tergantung pada kadar karbon. Makin tinggi kadar karbon suatu baja makin rendah temperatur awal dan akhir dari pembentukan martensit tersebut terlihat bahwa untuk baja dengan kadar karbon lebih dari 0,5%, transformasi ke martensit akan selesai pada temperatur dibawah temperatur kamar. Dengan demikian, jika kadar karbon melampaui 0,5%, maka pada temperatur kamar akan terdapat martensit dan austenit sisa. Makin tinggi kadar karbon, pada baja akan makin besar jumlah austenit sisanya. Austenit: yang belum sempat bertransformasi menjadi martensit disebut sebagai austenit sisa. Untuk mengkonversikan austenit sisa menjadi martensit, kepada baja tersebut harus diterapkan proses (subzero treatment).

Disamping karbon, unsur-unsur seperti Mn, Si, Ni, Cr Mo dan juga menggeserkan temperatur M_s . Penurunan titik M_s sebanding dengan jumlah unsur yang larut dalam austenit. Dari semua unsur tersebut diatas terlihat bahwa karbon yang memberi pengaruh lebih besar terhadap penurunan temperatur M_s . Struktur martensit tampak seperti jarum atau pelat-pelat halus. Halus kasarnya pelat atau jarum tergantung pada ukuran butir dari austenit. Jika butir austenitnya besar maka martensit yang akan diperoleh menjadi lebih kasar. Pembentukan martensit diiringi juga

kenaikan volume spesifik sekitar 3%. Hal inilah yang menyebabkan mengapa timbul tegangan pada saat dikeraskan. Tegangan yang terjadi dapat menimbulkan distorsi dan bahkan dapat menyebabkan timbulnya retak.

Penyebab tingginya kekerasan martensit adalah karena latis besi mengalami regangan yang tinggi akibat adanya atom-atom karbon. Berdasarkan hal ini, kekerasan martensit sangat dipengaruhi oleh kadar karbon. Kekerasan martensit berkisar antara 20 - 67 HRC. Makin tinggi kadar karbon dalam martensit, makin besar distorsi yang dialami oleh latis besi dalam ruang dan mengakibatkan makin tingginya kekerasan martensit.

SEMENTIT:

Sementit adalah senyawa besi dengan karbon yang umum dikenal sebagai karbida besi dengan rumus kimianya Fe_3C (prosentase karbon pada sementit adalah sekitar 6,67 %) Sel satuannya adalah ortorombik dan bersifat keras dengan harga kekerasannya sekitar 65-68 HRC. Pada struktur hasil anil karbida tersebut akan berbentuk bulat dan tertanam dalam matrik ferit yang lunak dan dapat berfungsi sebagai pemotong geram sehingga dapat meningkatkan mampu mesin dari baja yang bersangkutan. Keberadaan karbida-karbida pada baja-baja yang dikeraskan, terutama pada HSS dan baja cold-worked dapat meningkatkan ketahanan aus.

KARBIDA:

Unsur - unsur paduan seperti Karbon, mangan, chrom, wolfram, Molibden dan Vanadium banyak digunakan pada baja - baja perkakas (seperti pada baja Cold-worked, baja hot-worked dan HSS) untuk meningkatkan ketahanan baja tersebut terhadap keausan dan memelihara stabilitas baja tersebut pada temperatur tinggi. Keberadaan unsur paduan tersebut pada

baja akan menimbulkan terbentuknya karbida seperti: M_3C , $M_{23}C_6$, M_6C , M_7C_3 dimana M menyatakan atom-atom logam sedangkan C menyatakan kadar karbon. Karbida-karbida ini memiliki kekerasan yang sangat tinggi, sehingga dapat meningkatkan ketahanan aus dari baja perkakas ybs sebanding dengan volume karbida di dalam baja dan harga kekerasan dari karbida ybs.

Banyaknya karbida yang ada pada suatu baja perkakas tergantung pada prosentase karbon dan unsur paduan serta tergantung pada jenis karbida yang akan terbentuk. Pada baja hypereutektoid yang sudah dikeraskan, keberadaan karbida adalah sekitar 5-12%. Sedangkan pada struktur yang dianil, jumlah tersebut akan bertambah banyak. Pada saat diaustenisasi, karbida-karbida ini akan memperkaya austenit dengan karbon dan unsur-unsur paduan.

Unsur paduan yang memperkaya austenit seperti: Cr, W, Mo atau V akan menciptakan kondisi yang dapat mempermudah terbentuknya presipitasi karbida - karbida pada saat dikeraskan maupun pada saat ditemper. Kondisi seperti itu dapat meningkatkan stabilitas termal dari baja ybs dan juga meningkatkan kekerasan sekitar 3-5 HRC.

BAB.VI. DIAGRAM TTT DAN CCT

6.1. Diagram TTT

Maksud utama dari proses perlakuan panas terhadap baja adalah agar diperoleh struktur yang diinginkan supaya cocok dengan penggunaan yang direncanakan. Struktur tersebut dapat diperkirakan dengan cara menerapkan proses perlakuan panas yang spesifik. Struktur yang diperoleh merupakan hasil dari proses transformasi dari kondisi sebelumnya (awal). Beberapa proses transformasi dapat dibaca melalui diagram fasa. Diagram fasa Fe-C dapat digunakan untuk memperkirakan beberapa kondisi transformasi tetapi untuk kondisi tidak setimbang tidak dapat menggunakan diagram fasa. Dengan demikian, untuk setiap kondisi transformasi lebih baik menggunakan diagram TTT (Time – Temperature - Transformation). Diagram ini menghubungkan transformasi austenit terhadap waktu dan temperatur. Nama lain dari diagram ini adalah diagram S atau diagram C. Melalui diagram ini dapat dipelajari kelakuan baja pada setiap tahap perlakuan panas. Diagram ini dapat juga digunakan untuk memperkirakan struktur dan sifat mekanik dari baja yang diquench (disepuh) dari temperatur austenitisasinya ke suatu temperatur dibawah A1.

Pengaruh laju pendinginan pada transformasi austenit dapat diuraikan melalui penggunaan diagram TTT untuk jenis baja tertentu. Pada diagram ini sumbu tegak menyatakan temperatur sedangkan sumbu datar menyatakan waktu yang diplot dalam skala logaritmik. Diagram ini merupakan ringkasan dari beberapa jenis struktur mikro yang diperoleh dari rangkaian percobaan yang dilakukan pada spesimen yang kecil yang dipanaskan pada temperatur austenitisasinya, kemudian diquench pada temperatur tertentu dibawah titik eutektoid A1, untuk jangka waktu yang tertentu pula sampai seluruh austenit bertransformasi. Proses transformasi

dari austenit pada baja yang bersangkutan diamati dan dipelajari dengan menggunakan mikroskop.

Produk yang diperoleh dari transformasi austenit dapat dikelompokkan kedalam tiga kelompok. Pada rentang temperatur antara A1 sampai kira-kira akan terbentuk perlit. Tetapi perlit yang terbentuk pada temperatur sekitar 700°C akan lebih kasar; sedangkan perlit yang terbentuk pada temperatur sekitar 550°C akan lebih halus. Dibawah temperatur ini, yaitu 450°C akan terbentuk **upper bainite** dan pada temperatur sekitar 250°C yaitu sedikit di atas Ms akan terbentuk **lower bainite**. Harga kekerasan dari struktur tersebut di atas dapat dibaca pada skala yang terdapat disebelah kanan kurva.

Pada diagram TTT; kurva B menyatakan awal dari transformasi austenit, sedangkan kurva E menyatakan waktu yang diperlukan untuk mentransformasikan seluruh austenit. Daerah disebelah kiri kurva B menyatakan perioda Inkubasi dimana transformasi dari austenit belum dimulai. Terlihat bahwa proses transformasi yang paling cepat terjadi pada temperatur sekitar 550°C, dimana awal transformasi dapat berlangsung kurang dari satu detik. Dan dalam waktu 5 detik seluruh fasa austenit sudah bertransformasi. Hal ini menunjukkan bahwa laju pendinginan untuk memperoleh Martensit atau Bainit harus cepat, dan ini hanya terjadi dengan Jalan dicelup ke dalam air (diquench).

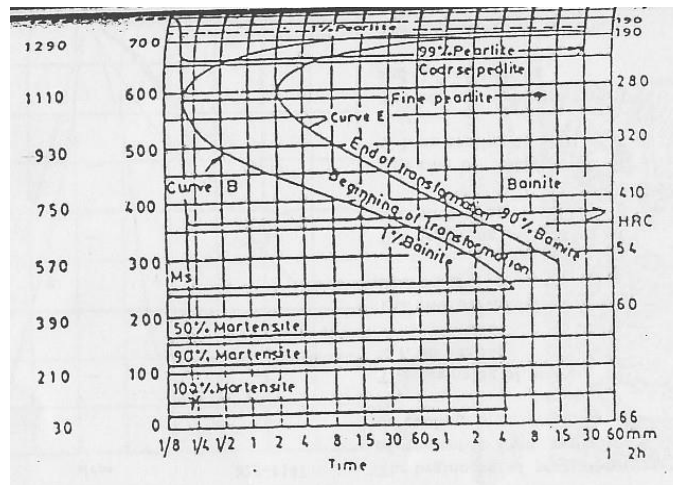
Perlit yang terbentuk pada temperatur yang lebih tinggi memiliki kekerasan yang lebih rendah dibanding Perlit yang halus. Hal ini erat kaitannya dengan kelakuan presipitasi sementit dari austenit,

Bainit yang terbentuk pada temperatur yang lebih tinggi memiliki kekerasan yang lebih rendah dibanding dengan Bainit yang terbentuk pada temperatur yang lebih rendah. Struktur Bainit yang terbentuk pada temperatur yang lebih tinggi relatif berbeda dengan struktur bainit yang terbentuk pada temperatur yang lebih rendah

Pembentukan Martensit sangat berbeda dibandingkan dengan Pembentukan perlit atau bainit. Pembentukan martensit hampir tidak tergantung pada waktu. Sebagai contoh: Martensit mula terbentuk sekitar 200°C (Ms) dan terus berlanjut sampai temperatur mencapai 29°C yaitu pada saat Martensit mencapai 100% (Mf).

Pembentukan martensit dikaitkan dengan waktu pada diagram dinyatakan dengan garis horizontal. Pada 99°C hampir 90 % martensit telah terbentuk. Perbandingan ini tidak berubah terhadap waktu sepanjang temperturnya dijaga konstan.

Pengaruh laju pendinginan pada transformasi austenit dapat diuraikan melalui penggunaan diagram TTT untuk jenis baja tertentu. Seperti gambar 9.1 di bawah menggambarkan diagram TTT untuk baja dengan kadar karbon 1%.



Gambar 6.1. Diagram TTT untuk baja Karbon 1%C

Pada diagram ini, sumbu tegak menyatakan temperatur sedangkan sumbu mendatar menyatakan waktu yang diplot dalam skala logaritmik. Diagram ini merupakan ringkasan dari beberapa jenis struktur mikro yang diperoleh dari rangkaian percobaan yang dilakukan pada spesimen yang kecil yang

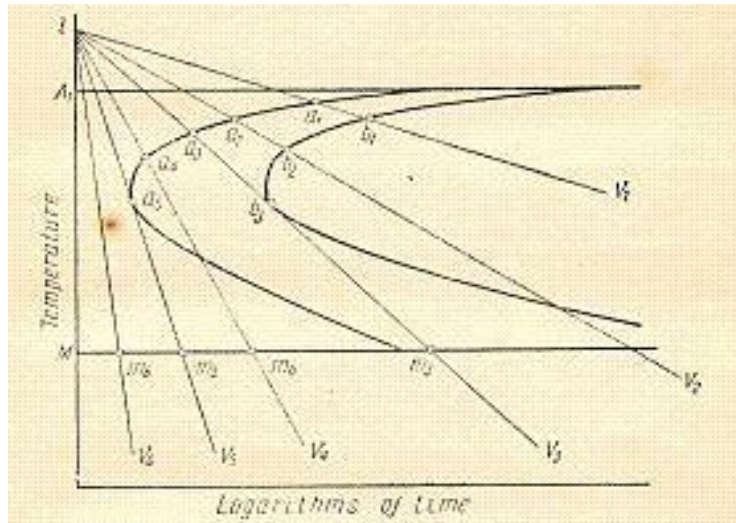
dipanaskan pada temperatur austenisasinya, kemudian diquench pada temperatur tertentu di bawah titik eutektoid A_1 untuk jangka waktu yang tertentu pula sampai seluruh transformasi austenit.

Produk yang diperoleh dari transformasi austenit dapat dikelompokkan ke dalam tiga kelompok. Pada rentang temperatur antara A_1 sampai kira – kira 550°C akan terbentuk perlit. Tetapi perlit yang terbentuk sekitar 700°C akan lebih kasar, sedangkan perlit yang terbentuk pada temperatur 550°C akan lebih halus. Pada temperatur sekitar 450°C akan terbentuk upper bainit dan pada temperatur 250°C yaitu sekitar sedikit di atas M_s akan terbentuk lower bainit. Harga kekerasan dari struktur – struktur tersebut dapat dibaca pada skala yang terdapat disebelah kanan kurva.

Perlit yang terbentuk pada temperatur yang lebih tinggi memiliki kekerasan yang lebih rendah dibanding perlit yang halus. Hal ini erat kaitannya dengan kelakuan persipitasi sementit dari austenit. Bainit yang terbentuk pada temperatur yang lebih tinggi memiliki kekerasan yang lebih rendah dibanding dengan bainit yang terbentuk pada temperatur yang lebih rendah. Struktur bainit terbentuk pada temperatur yang lebih tinggi relatif berbeda dengan struktur bainit yang terbentuk pada temperatur yang lebih rendah.

6.2. Diagram CCT

Saat kondisi perlakuan panas sebenarnya, transformasi umumnya tidak terjadi saat kondisi isothermal tetapi terjadi saat kondisi pendinginan yang terus menerus (Continuous Cooling). Proses ini dapat kita lihat pada diagram CCT (Continuous Cooling Transformation) berikut:



Gambar 6.2. Diagram CCT pada baja Karbon.

Beberapa spemen baja eutektoid dipanaskan pada temperatur di atas titik A_1 . Temperatur ini ditunjukkan oleh diagram CCT di atas sebagai titik t . kemudian baja didinginkan dengan berbagai macam variasi pendinginan. Proses pendinginan diperlihatkan oleh garis miring dimana semakin miring garis yang terbentuk semakin cepat pendinginannya. Pendinginan yang paling lambat (untuk annealing) diperlihatkan oleh garis lurus v_1 , pendinginan yang sedikit lebih cepat diperlihatkan oleh garis v_2 , yang lebih cepat (untuk quenching dengan oli) diperlihatkan oleh garis v_3 dan v_4 dan yang paling cepat (pendinginan dengan air) ditunjukkan oleh garis v_5 dan v_6 .

Saat pendinginan paling lambat pada garis v_1 yang berpotongan dengan dua buah kurva transformasi berikut sewaktu awal transformasi berpotongan pada titik a_1 dan dan kurva akhir transformasi berpotongan dengan titik b_1 . Ini berarti bahwa pendinginan yang lambat, austenit seluruhnya bertransformasi menjadi agregat ferit – sementit.

Karena transformasi terjadi sewaktu temperatur tertinggi (range temperatur $A_1 - M$), butiran ferit – sementit bergumpal dan sedikit menyebar dengan bentuk yang lain yang disebut dengan perlit.

Pendinginan yang lebih cepat (seperti sewaktu normalizing) garis v_2 juga berpotongan dengan dua kurva transformasi. Ini berarti bahwa meskipun austenit telah seluruhnya berubah menjadi gumpalan ferit sementit, namun pada range $a_2 - b_2$, melalui temperatur yang lebih merata yang disebut dengan sorbit.

Pendinginan yang tidak melewati v_3 , kurva memperlihatkan proses pendinginan memotong kedua kurva transformasi, yang menghasilkan dekomposisi austenit menjadi butiran ferit sementit. Pendinginan yang lebih cepat dari v_3 , seperti v_4 , garis v_4 hanya memotong kurva pada saat awal transformasi (titik a_4), dan tidak melewati kurva akhir transformasi. Ini berarti, ferit sementit mulai terbentuk namun tidak seluruhnya. Dengan kata lain sebagian volume butir austenit berubah jadi ferit dan sementit, namun bagian lainnya menjadi martensit sewaktu mencapai temperatur M (di titik M_4). Dengan demikian, struktur baja dingin pada v_4 sebagian terdiri dari troostie dan yang lainnya martensit. Struktur yang aneh ini pada seluruh baja didinginkan lebih cepat dari v_3 , namun lebih lambat dari v_5 . Untuk baja karbon pendinginan ini sama dengan quenching dalam oli.

BAB.VII. HARDENABILITY

7.1.Hardenability

Mampu keras merujuk kepada sifat baja yang menentukan dalamnya pengerasan sebagai akibat proses quench dari temperatur austenisasinya.

Mampu keras tidak dikaitkan dengan kekerasan maksimum yang dapat dicapai oleh beberapa jenis baja. Kekerasan permukaan dari suatu komponen yang terbuat dari baja tergantung pada kadar karbon dan laju pendinginan. Dalamnya pengerasan yang memberikan harga kekerasan yang sama hasil dari suatu proses quench merupakan fungsi dari mampu keras. Mampu keras semata-mata tergantung pada prosentase unsur-unsur paduan, besar butir austenit, temperatur austenisasi, lama pemanasan dan strukturmikro baja tersebut sebelum dikeraskan.

Perlu dibedakan antara pengertian kekerasan dan kemampukerasan (*hardenability*). Kekerasan adalah ukuran dari pada daya tahan terhadap deformasi plastik. Sedangkan kemampu kerasan adalah kemampuan bahan untuk dikeraskan.

Hubungan antara kekerasan dengan meningkatnya kadar karbon dalam baja menunjukkan bahwa kekerasan maksimum hanya dapat dicapai bila terbentuk martensit 100 %. Baja yang dengan cepat bertransformasi dari austenit menjadi ferit dan karbida mempunyai kemampukerasan yang rendah, karena dengan terjadinya transformasi pada suhu tinggi, martensit tidak terbentuk.

Sebaliknya baja dengan transformasi yang lambat dari austenit ke ferit dan karbida mempunyai kemampukerasan yang lebih keras. Kekerasan mendekati maksimum dapat dicapai pada baja dengan kemampukerasan

yang tinggi, dengan pencelupan sedang dan di bagian tengah baja dapat dicapai kekerasan yang tinggi meskipun laju pendinginan lebih lambat.

7.1.1. Mampu keras kuantitatif.

Mampu keras dapat dinyatakan secara kuantitatif dengan diameter kritik atau tebal penampang. Diameter dapat di definisikan sebagai suatu diameter yang jika di quench pada medium pendingin tertentu, dibagian tengahnya akan diperoleh kekerasan tertentu atau akan diperoleh suatu struktur yang mengandung martensit dengan prosentase tertentu. Biasanya akan terdiri dari 50% martensit dan 50% perlit. Mampu keras suatu baja dapat ditingkatkan dengan menambah unsur-unsur paduan. Dan ini berarti akan ada pula peningkatan terhadap diameter kritiknya. Disamping itu diameter kritik tergantung juga pada kemampuan jenis medium pendingin.

7.1.2. Pengujian Jominy.

Metode yang paling umum dalam menentukan mampu keras suatu baja adalah dengan cara mencelupkan secara cepat (*quench*) salah satu ujung dari batang uji (metode ini dikembangkan oleh Jominy Boegehold dari Amerika). Metode seperti ini disebut uji Jominy. Untuk melaksanakan pengujian, suatu batang uji dengan panjang 100 mm dan diameter 25 mm, salah satu ujungnya diperlebar untuk memudahkan batang uji tersebut digantungkan pada peralatan *quench*. Salah satu ujung yang lain dari batang uji yang akan disemprot air, permukaannya harus dihaluskan. Batang uji tersebut dipanaskan pada temperatur austenisasi selama 30 - 35 menit. Atmosfir tungku harus dijaga netral agar tidak terjadi pembentukan terak dan karburasi.

Setelah proses pemanasan selesai, batang uji digantungkan pada peralatan quench dan kemudian salah satu ujungnya dicelupkan dengan cepat (*quench*) pada air yang bertemperatur 25⁰C. Diameter dari berkas air yang

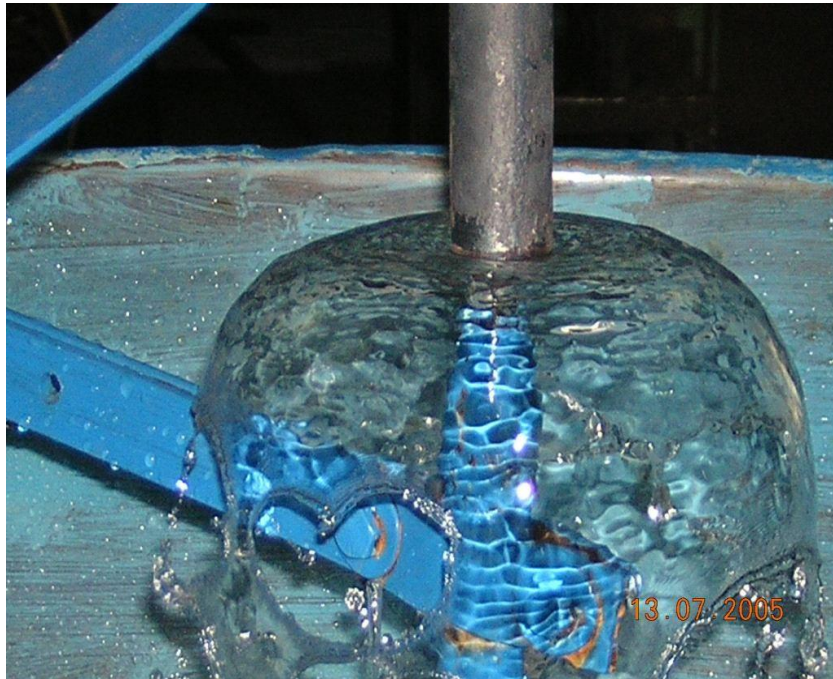
dipancarkan kira-kira 12 mm dan harus memancar 65 mm dari ujung pipa air.



Gambar 7.1 : Alat Jominy Test



Gambar 7.2 : Dalam Proses Pencelupan Cepat



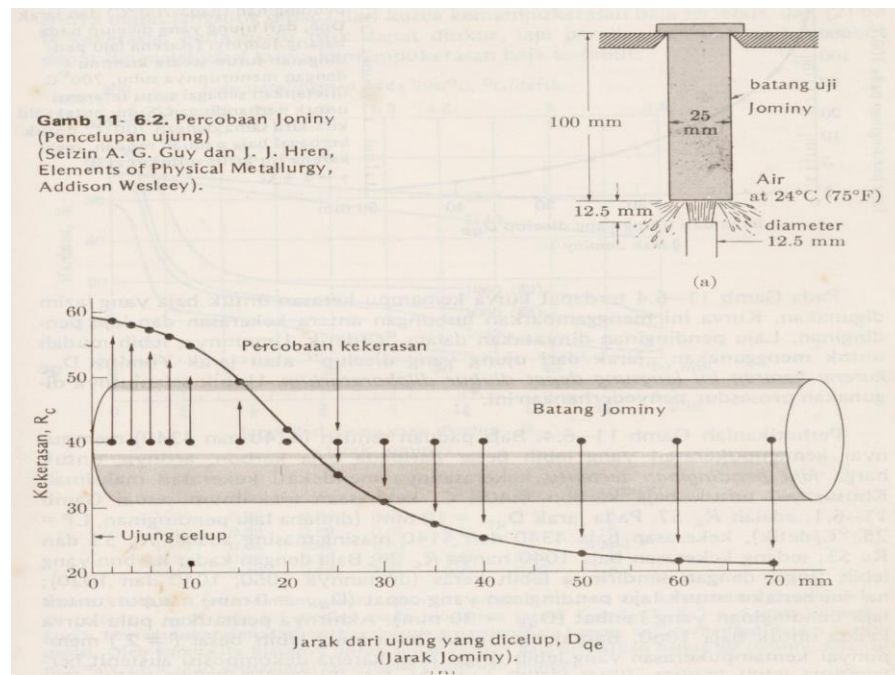
Gambar 7.3. : Diameter air yang dipancarkan kira-kira 12 mm

Dari sejak batang uji dikeluarkan dari tungku sampai diletakkan pada peralatan quench tidak boleh lebih dari 5 detik sesaat sesudah batang uji diletakkan air segera disemprotkan dan lebih kurang 10 menit. Berdasarkan hal ini ujung batang uji akan mengalami pendinginan yang sangat cepat. Laju pendinginan akan menurun kearah salah satu ujungnya yang lain. Dengan demikian sepanjang batang uji akan terjadi variasi laju pendinginan. Sepanjang batang uji diukur kekerasannya dengan menggunakan Rockwell dan hasilnya diplot pada diagram mampukeras yang standar.

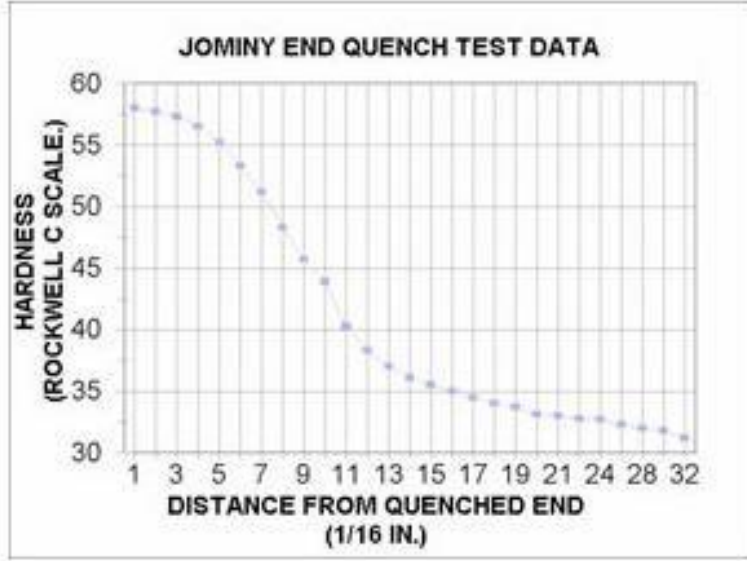
Langkah Kerja dan Proses Jominy Test :

- a. Siapkan alat dan bahan uji (spesimen dengan ukuranstandar), kemudian masukkan ke dalam furnace.

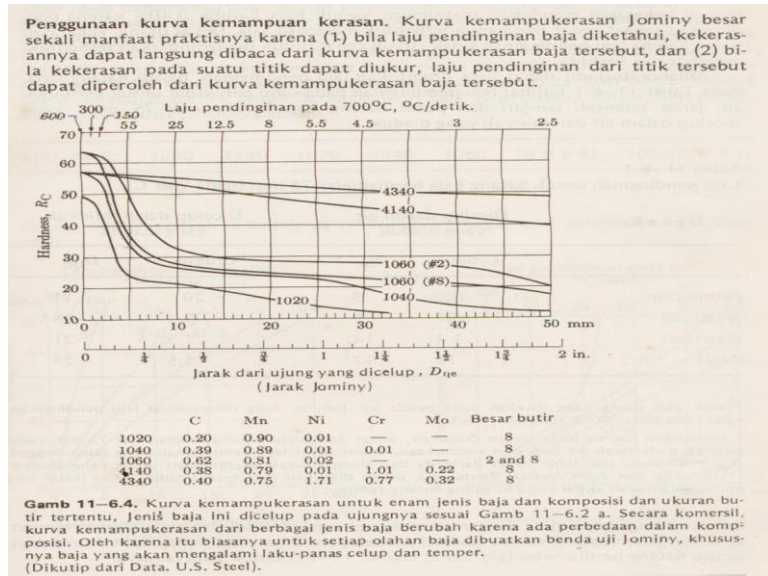
- b. Hidupkan/nyalakan dapur pemanas sampai temperatur austenisasi, kemudian ditahan sekitar 5 menit agar homogen. (Atmosfir tungku harus dijaga netral agar tidak terjadi pembentukan terak dan karburasi)
- c. Keluarkan spesimen dari dalam dapur untuk didinginkan (sejak batang uji dikeluarkan dari tungku sampai diletakkan pada peralatan quench tidak boleh lebih dari 5 detik)
- d. Pendinginan dengan cara batang uji digantungkan pada peralatan quench dan kemudian salah satu ujungnya dicelupkan dengan cepat (*quench*) pada air yang bertemperatur 25°C. (Sesaat sesudah batang uji diletakkan, air segera disemprotkan lebih kurang 10 menit).
- e. Lakukan pengujian kekerasan di permukaan memanjang benda uji yang telah ditandai dengan alat uji kekerasan yang tersedia



- f. Masukkan data nilai kekerasan dari titik-titik pengujian ke posisi yang sesuai pada kertas millimeter atau kertas yang telah diskalakan . (seperti gambar di bawah ini)



- g. Lakukan analisa terhadap Kurva *Jominy End Quench Data Test*, dan bandingkan grafik tersebut dengan kurva kemampukerasan jenis baja lainnya (seperti gambar di bawahini)



- h. Buat laporan hasil percobaan, dan simpulkan apa yang diperoleh dari kegiatan ini.

7.3. Pengujian Grossman

Grossman telah menetapkan sejumlah faktor penggali untuk unsur-unsur paduan utama pada baja seperti Si, Mn, Cr dan Mo, sedangkan untuk unsur karbon telah ditentukan sejumlah faktor-faktor yang dikaitkan dengan diameter kritik dari baja, dengan kadar karbon tertentu dimana baja tersebut akan mengeras seluruhnya jika diquench dengan cara ideal. Bagian luar dari batang uji dianggap segera mendingin ke temperatur medium pendinginnya. Diameter tersebut kemudian dinyatakan sebagai diameter kritik ideal (D_i).

BAB.VIII : PERLAKUAN PANAS

Perlakuan panas adalah proses pemanasan dan pendinginan material yang terkontrol dengan maksud merubah sifat fisik untuk tujuan tertentu. Secara umum proses perlakuan panas adalah sebagai berikut:

- a. Pemanasan material sampai suhu tertentu dengan kecepatan tertentu pula.
- b. Mempertahankan suhu untuk waktu tertentu sehingga temperaturnya merata
- c. Pendinginan dengan media pendingin (air, oli atau udara)

Ketiga hal diatas tergantung dari material yang akan di heat treatment dan sifat-sifat akhir yang diinginkan. Melalui perlakuan panas yang tepat tegangan dalam dapat dihilangkan, besar butir diperbesar atau diperkecil, ketangguhan ditingkatkan atau dapat dihasilkan suatu permukaan yang keras di sekeliling inti yang ulet. Untuk memungkinkan perlakuan panas yang tepat, susunan kimia logam harus diketahui karena perubahan komposisi kimia, khususnya karbon(C) dapat mengakibatkan perubahan sifat fisis.

8.1. Annealing

Proses *annealing* yaitu proses pemanasan material sampai temperatur austenit lalu ditahan beberapa waktu kemudian pendinginannya dilakukan perlahan-lahan di dalam tungku. Keuntungan yang didapat dari proses ini adalah sebagai berikut :

1. Menurunkan kekerasan
2. Menghilangkan tegangan sisa
3. Memperbaiki sifat mekanik
4. Memperbaiki mampu mesin dan mampu bentuk
5. Menghilangkan terjadinya retak pana

6. Menurunkan atau menghilangkan ketidak homogenan struktur
7. Memperhalus ukuran butir
8. Menghilangkan tegangan dalam dan menyiapkan struktur baja untuk proses perlakuan panas.

Proses Anil tidak dimaksudkan untuk memperbaiki sifat mekanik baja perlitik dan baja perkakas. Sifat mekanik baja struktural diperbaiki dengan cara dikeraskan dan kemudian diikuti dengan tempering. Proses Anil terdiri dari beberapa tipe yang diterapkan untuk mencapai sifat-sifat tertentu sebagai berikut :

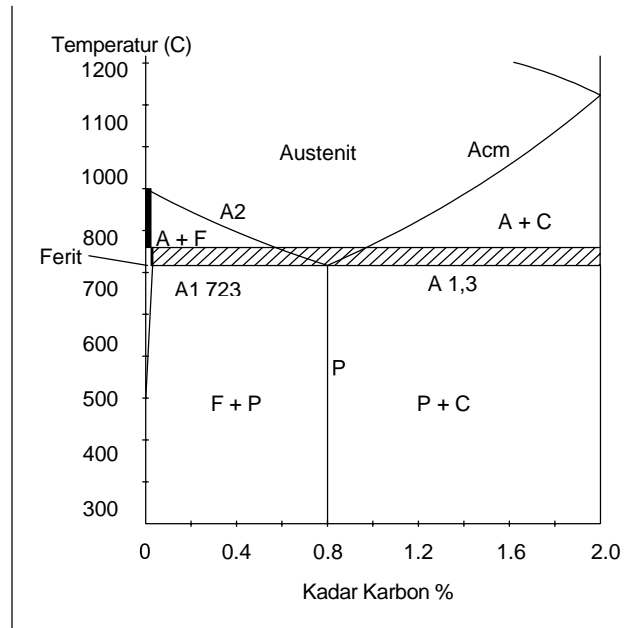
8.1.1 *Full Annealing*

Full annealing terdiri dari *austenisasi* dari baja yang bersangkutan diikuti dengan pendinginan yang lambat di dalam dapur. Temperatur yang dipilih untuk austenisasi tergantung pada karbon dari baja yang bersangkutan. *Full annealing* untuk baja *hipoeutektoid* dilakukan pada temperatur *austenisasi*

sekitar 50°C diatas garis A_3 dan untuk baja *hipereutektoid* dilaksanakan dengan cara memanaskan baja tersebut diatas A_1 . *Full Annealing* akan memperbaiki mampu mesin dan juga menaikkan kekuatan akibat butir-butirnya menjadi halus.

8.1.2. *Spheroidized Annealing*

Spheroidized annealing dilakukan dengan memanaskan baja sedikit diatas atau dibawah temperatur kritik A_1 (lihat Gambar 11.1) kemudian didiamkan pada temperatur tersebut untuk jangka waktu tertentu kemudian diikuti dengan pendinginan yang lambat. Tujuan dari *Spheroidized annealing* adalah untuk memperbaiki mampu mesin dan memperbaiki mampu bentuk.



Gambar 8.1: Diagram untuk temperatur *Spheroidized annealing*

8.1.3. Isothermal Annealing

Isothermal annealing dikembangkan dari diagram TTT. Jenis proses ini dimanfaatkan untuk melunakkan baja-baja sebelum dilakukan proses permesinan. Proses ini terdiri dari *austenisasi* pada temperatur *annealing* (*Full annealing*) kemudian diikuti dengan pendinginan yang relatif cepat sampai ke temperatur 50 - 60°C dibawah garis A₁ (menahan secara *isothermal* pada daerah *perlit*).

8.1.4. Proses Homogenisasi

Proses ini dilakukan pada rentang temperatur 1100 - 1200°C. Proses difusi yang terjadi pada temperatur ini akan menyeragamkan komposisi baja. Proses ini diterapkan pada ingot baja-baja paduan dimana pada saat membeku sesaat setelah proses penuangan, memiliki struktur yang tidak

homogen. Seandainya ketidakhomogenan tidak dapat dihilangkan sepenuhnya, maka perlu diterapkan proses homogenisasi atau "*diffusional annealing*". Proses homogenisasi dilakukan selama beberapa jam pada temperatur sekitar 1150 - 1200°C. Setelah itu, benda kerja didinginkan ke 800 - 850°C, dan selanjutnya didinginkan diudara. Setelah proses ini, dapat juga dilakukan proses normal atau anil untuk memperhalus struktur *over-heat*. Perlakuan seperti ini hanya dilakukan untuk kasus-kasus yang khusus karena biaya prosesnya sangat tinggi.

8.1.5. Stress Relieving

Stress relieving adalah salah satu proses perlakuan panas yang ditujukan untuk menghilangkan tegangan-tegangan yang ada di dalam benda kerja, memperkecil distorsi yang terjadi selama proses perlakuan panas dan, pada kasus-kasus tertentu, mencegah timbulnya retak. Proses ini terdiri dari memanaskan benda kerja sampai ke temperatur sedikit dibawah garis A1 dan menahannya untuk jangka waktu tertentu dan kemudian di dinginkan di dalam tungku sampai temperatur kamar. Proses ini tidak menimbulkan perubahan fasa kecuali rekristalisasi. Banyak faktor yang dapat menimbulkan timbulnya tegangan di dalam logam sebagai akibat dari proses pembuatan logam yang bersangkutan menjadi sebuah komponen. Beberapa dari faktor-faktor tersebut antara lain adalah : Pemesinan, Pembentukan, Perlakuan panas, Pengecoran, Pengelasan, dan lain-lain. Penghilangan tegangan sisa dari baja dilakukan dengan memanaskan baja tersebut pada temperatur sekitar 500 - 700°C, tergantung pada jenis baja yang diproses. Pada temperatur diatas 500 - 600°C, baja hampir sepenuhnya elastik dan menjadi ulet. Berdasarkan hal ini, tegangan sisa yang terjadi di dalam baja pada temperatur seperti itu akan sedikit demi sedikit dihilangkan melalui deformasi plastik setempat akibat adanya tegangan sisa tersebut.

8.1.6. Timbulnya Tegangan di dalam Benda Kerja

Beberapa faktor penyebab timbulnya tegangan di dalam logam sebagai akibat dari proses pembuatan logam tersebut menjadi sebuah komponen adalah :

1. Pemesinan

Jika suatu komponen mengalami proses pemesinan yang berat, maka akan timbul tegangan di dalam komponen tersebut. Tegangan yang berkembang di dalam benda kerja dapat menimbulkan retak pada saat dilaku panas atau mengalami distorsi. Hal ini disebabkan karena adanya perubahan pada pola kesetimbangan tegangan akibat penerapan proses pemesinan yang berat.

2. Pembentukan

Proses metal forming juga akan mengakibatkan tegangan dalam akan berkembang, seperti pada proses coining, bending, drawing, dan sebagainya.

3. Perlakuan Panas

Perlakuan panas juga merupakan salah satu penyebab timbulnya tegangan dalam komponen. Hal ini terjadi sebagai akibat tidak homogenya pemanasan dan pendinginan atau sebagai akibat terlalu cepatnya laju pemanasan ke temperatur austenitisasi. Pada beberapa kasus, tegangan dalam terjadi akibat adanya transformasi fasa selama proses pendinginan berlangsung. Transformasi fasa senantiasa diiringi dengan perubahan volume spesifik.

4. Pengecoran

Tegangan dalam selalu ada pada produk-produk cor sebagai akibat dari tidak meratanya pendinginan dari permukaan ke bagian dalam benda kerja dan juga akibat adanya perbedaan laju pendinginan pada berbagai bagian produk cor yang sama.

5. Pengelasan

Tegangan dalam juga terjadi pada suatu komponen yang mengalami pengelasan, soldering, dan brazing. Tegangan tersebut terjadi karena adanya pemuaian dan pengkerutan di daerah yang dipengaruhi panas (HAZ) dan juga di daerah logam las.

8.1.7. Temperatur Stress Relieving

Tegangan sisa yang terjadi di dalam logam sebagai akibat dari faktor-faktor di atas harus dapat dihilangkan, agar sifat yang diinginkan dari komponen tersebut dapat diperoleh. Proses penghilangan tegangan sisa biasanya dilakukan dengan cara memanaskan benda kerja di bawah temperatur A_1 . Pemanasan menyebabkan turunnya kekuatan mulur logam.

Penghilangan tegangan sisa pada baja dilakukan dengan memanaskan baja tersebut pada temperatur sekitar 550 - 700 C, tergantung pada jenis baja yang diproses. Pada temperatur di atas 500 - 600 C, baja hampir sepenuhnya elastik dan menjadi ulet. Berdasarkan hal tersebut, tegangan sisa yang terjadi di dalam baja pada temperatur itu akan sedikit demi sedikit dihilangkan melalui deformasi plastik setempat akibat adanya tegangan sisa tersebut.

Setelah dipanaskan sampai temperatur stress relieving, benda kerja ditahan pada temperatur itu untuk jangka waktu tertentu agar diperoleh distribusi temperatur yang merata di seluruh benda kerja. Kemudian didinginkan

dalam tungku sampai temperatur 300 C dan selanjutnya didinginkan di udara sampai ke temperatur kamar. Perlu diperhatikan bahwa selama pendinginan, laju pendinginan harus rendah dan homogen agar dapat dicegah timbulnya tegangan sisa yang baru. Temperatur stress relieving yang spesifik dan lazim diterapkan pada beberapa jenis baja adalah :

Jenis Baja	Temperatur
HSS	650 – 700 C
Hot-worked	650 – 670 C
Cold – worked	650 – 700 C
Nitriding	550 – 600 C
High Temperature Bearing	600 – 650 C
Free - cutting	600 – 650 C
	600 – 650 C

Untuk menghilangkan semua tegangan sisa yang ada, proses stress relieving harus dilakukan pada temperatur mendekati temperatur yang tertinggi pada rentang temperatur yang diijinkan, tetapi hal ini akan menimbulkan oksidasi dipermukaan benda kerja dan timbulnya pelunakan pada baja-baja hasil proses pengerasan atau temper. Oleh sebab itu disarankan agar melakukan stress relieving pada temperatur yang relatif lebih rendah dari rentang temperatur yang diijinkan. Semakin tinggi temperatur stress relieving akan menyebabkan makin rendah tegangan sisa yang ada pada benda kerja. Benda kerja yang dikeraskan dan ditemper harus di stress relieving pada temperatur sekitar 25 dibawah temperatur tempernya. Tegangan sisa yang terjadi akibat proses pengelasan dapat dihilangkandengan memanaskan benda kerja sekitar 600 – 650°C dan ditahan padatemperatur tersebut untuk jangka waktu tertentu. Biasanya, waktu

penahanan yang diperlukan sekitar 3 – 4 menit untuk setiap mm tebal benda kerja, kemudian didinginkan dengan laju pendinginan sekitar 50 - 100 C per jam sampai ke temperatur 300 C. Pendinginan yang rendah dan homogen diperlukan untuk mencegah timbulnya tegangan sisa baru pada saat pendinginan dan untuk mencegah timbulnya retak.

Tegangan sisa bisa juga terjadi pada benda kerja yang dikeraskan akibat kesalahan penggerindaan. Tegangan tersebut bahkan dapat menimbulkan retak pada saat atau sesudah penggerindaan. Benda kerja tersebut biasanya diselamatkan dengan cara memberikan stress relieving antara 150 - 400 C pada atau dibawah temperatur tempemnya sesaat setelah dilakukan proses penggerindaan. Pahat-pahat juga akan memiliki tegangan sisa yang sangat tinggi pada saat digunakan. Dengan demikian, sangatlah bermanfaat untuk menerapkan stress relieving pada pahat-pahat tersebut dengan cara memanaskan pahat tersebut dibawah temperatur tempemnya.

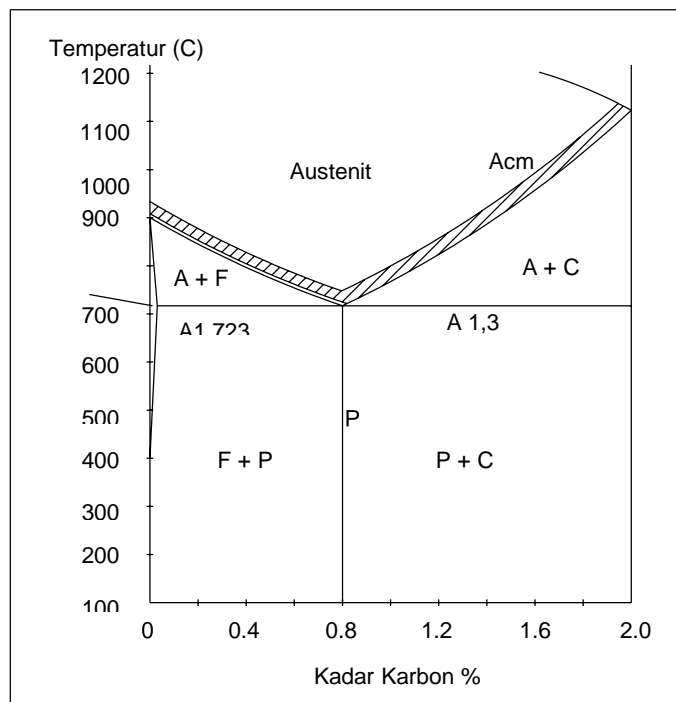
8.1.8. Tungku Pemanas untuk Stress Relieving

Siklus stress relieving sangat tergantung pada temperatur, oleh karena itu disarankan untuk menggunakan tungku yang baik, disarankan untuk menggunakan dapur listrik, dan pendinginan dalam dapur bertujuan untuk menghindari timbulnya tegangan sisa baru.

2. *Normalizing*

Proses *normalizing* atau menormalkan adalah jenis perlakuan panas yang umum diterapkan pada hampir semua produk cor, *over-heated forgings* dan produk-produk tempa yang besar. *Normalizing* ditujukan untuk memperhalus butir, memperbaiki mampu mesin, menghilangkan tegangan sisa dan juga memperbaiki sifat mekanik baja karbon struktural dan baja-baja paduan rendah. *Normalizing* terdiri dari proses pemanasan baja diatas

temperatur kritis A_3 atau A_{cm} dan ditahan pada temperatur tersebut untuk jangka waktu tertentu tergantung pada jenis dan ukuran baja (lihat Gambar 11.2). Agar diperoleh austenit yang homogen, baja-baja *hypoeutektoid* dipanaskan $30 - 40^\circ\text{C}$ diatas garis A_3 dan untuk baja *hypereutektoid* dilakukan dengan memanaskan $30 - 40^\circ\text{C}$ diatas temperatur A_{cm} . Kemudian menahannya pada temperatur tersebut untuk jangka waktu tertentu sehingga transformasi fasa dapat berlangsung diseluruh bagian benda kerja, dan selanjutnya didinginkan di udara.



Gambar 8.2: Diagram untuk temperatur *Normalizing*

Normalizing dilakukan karena tidak diketahui bagaimana proses dari pembuatan benda kerja ini apakah dikerjakan dingin (*cold Working*) atau pengerjaan Panas (*Hot Working*). Dimana *normalizing* ini bertujuan untuk mengembalikan atau memperhalus struktur butir dari benda kerja.

Normalizing terdiri dari proses pemanasan baja di atas temperatur kritis A_3 atau A_{cm} dan ditahan pada temperatur tersebut untuk jangka waktu tertentu

tergantung pada jenis dan ukuran baja. Agar diperoleh austenit yang homogen, baja – baja hypoeutektoid dipanaskan pada temperatur 30 – 40°C di atas garis A₃. Pemanasan pada temperatur austenit yang terlalu tinggi akan menyebabkan tumbuhnya butir – butir austenit. Demikian juga untuk waktu penahan pada temperatur austenit yang terlalu lama akan mengakibatkan tumbuhnya butir – butir austenit.

Setelah waktu penahan selesai, benda kerja kemudian didinginkan di udara. Struktur baja hypoeutektoid yang akan dihasilkan terdiri dari ferit dan perlit. Perlu diketahui bahwa batas – batas butir yang baru tidak ada hubungannya dengan batas – batas butir sebelum baja dinormalkan. Setelah penormalan akan terjadi perbaikan terhadap strukturnya diiringi dengan timbulnya perbaikan sifat mekaniknya.

Sifat mekanik yang akan diperoleh setelah proses penormalan tergantung pada laju pendinginan di udara. Laju pendinginan yang agak cepat akan menghasilkan kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi.

Manfaat proses *Normalizing* adalah sebagai berikut:

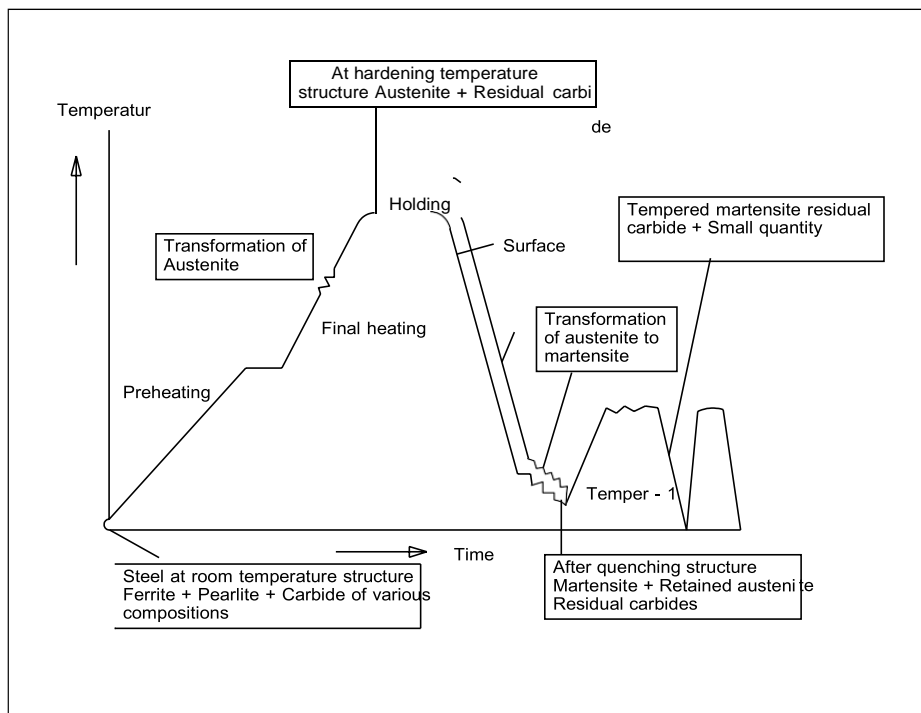
1. *Normalizing* biasa digunakan untuk menghilangkan struktur butir yang kasar yang diperoleh dari proses pengerjaan sebelumnya yang dialami oleh baja.
2. *Normalizing* berguna untuk mengeliminasi struktur kasar yang diperoleh akibat pendinginan yang lambat pada proses anil.
3. Berguna untuk menghilangkan jaringan sementit yang kontinyu yang mengelilingi perlit pada baja perkakas.
4. Menghaluskan ukuran perlit dan ferit.
5. Memodifikasi dan menghaluskan struktur cor dendritik.

6. Mencegah distorsi dan memperbaiki mampu karburasi pada baja – baja paduan karena temperatur *normalizing* lebih tinggi dari temperatur karbonisasi.

3. *Hardening*

Hardening adalah proses perlakuan panas yang diterapkan untuk menghasilkan benda kerja yang keras. Perlakuan ini terdiri dari memanaskan baja sampai temperatur pengerasannya (Temperatur austenisasi) dan menahannya pada temperatur tersebut untuk jangka waktu tertentu dan kemudian didinginkan dengan laju pendinginan yang sangat tinggi atau di *quench* agar diperoleh kekerasan yang diinginkan. Alasan memanaskan dan menahannya pada temperatur austenisasi adalah untuk melarutkan sementit dalam austenit kemudian dilanjutkan dengan proses *quench*.

Quenching merupakan proses pencelupan baja yang telah berada pada temperatur pengerasannya (temperatur *austenisasi*), dengan laju pendinginan yang sangat tinggi (*diquench*), agar diperoleh kekerasan yang diinginkan (lihat Gambar 11.3).



Gambar 8.3: Grafik pemanasan, *quenching* dan *tempering*

(Suratman,1994)

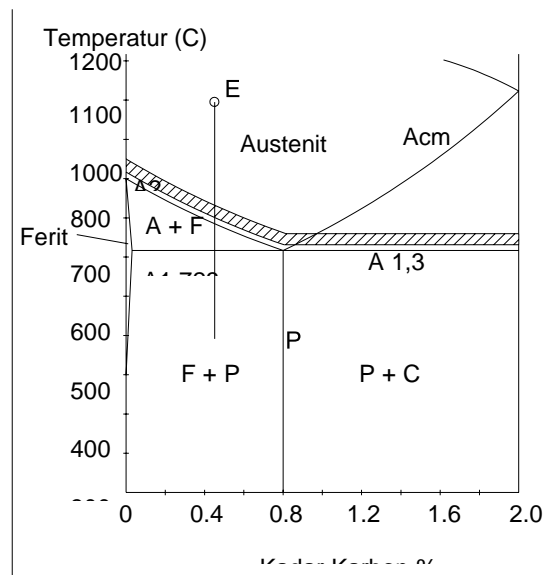
Pada tahap ini, karbon yang terperangkap akan menyebabkan tergesernya atom-atom sehingga terbentuk struktur *body center tetragonal*. Atom-atom yang tergeser dan karbon yang terperangkap akan menimbulkan struktur sel satuan yang tidak setimbang (memiliki tegangan tertentu). Struktur yang bertegangan ini disebut martensit dan bersifat sangat keras dan getas. Biasanya baja yang dikeraskan diikuti dengan proses penemperan untuk menurunkan tegangan yang ditimbulkan akibat *quenching* karena adanya pembentukan martensit (Suratman,1994).

Tujuan utama proses pengerasan adalah untuk meningkatkan kekerasan benda kerja dan meningkatkan ketahanan aus. Makin tinggi kekerasan akan semakin tinggi pula ketahanan ausnya.

3.1. Temperatur Pemanasan

Temperatur penerasan yang digunakan tergantung pada komposisi kimia (kadar karbon). Temperatur penerasan untuk baja karbon *hipoeutektoid* adalah sekitar 20 - 50 C di atas garis A₃, dan untuk baja karbon *hipereutektoid* adalah sekitar 30 - 50 C diatas garis A₁₃ (lihat Gambar 11.4)

Jika suatu baja misalnya mengandung misalnya 0.5 % karbon (berstruktur ferit dan perlit) dipanaskan sampai temperatur di bawah A₁, maka pemanasan tersebut tidak akan mengubah struktur awal dari baja tersebut. Pemanasan sampai temperatur diatas A₁ tetapi masih dibawah temperatur A₃ akan mengubah perlit menjadi austenit tanpa terjadi perubahan apa-apa terhadap feritnya.



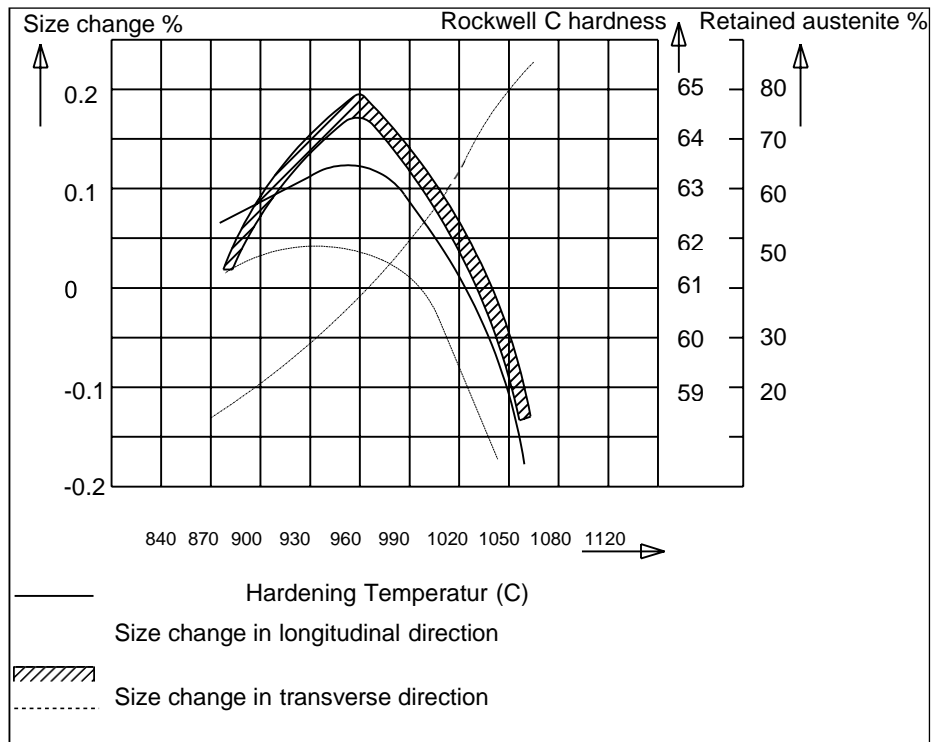
Gambar 8.4: Temperatur pemanasan sebelum *Quenching* (Suratman,1994)

Quenching dari temperatur ini akan menghasilkan baja yang semi keras karena austenitnya bertransformasi ke martensit sedangkan feritnya tidak berubah. Keberadaan ferit dilingkungan martensit yang getas tidak berpengaruh pada kenaikan ketangguhan. Jika suatu baja dipanaskan sedikit

diatas A3 dan ditahan pada temperatur tersebut untuk jangka waktu tertentu agar dijamin proses difusi yang homogen, maka struktur baja akan bertransformasi menjadi austenit dengan ukuran butir yang relatif kecil.

Quenching dari temperatur austenisasi akan menghasilkan martensit dengan harga kekerasan yang maksimum. Memanaskan sampai ke temperatur E (relatif lebih tinggi diatas A3) cenderung meningkatkan ukuran butir austenit. *Quenching* dari temperatur seperti itu akan menghasilkan struktur martensit, tetapi sifatnya, bahkan setelah ditemper sekalipun, akan memiliki harga impak yang rendah. Disamping itu mungkin juga timbul retak pada saat diquench.

Pada baja *hipereutektoid* dipanaskan pada daerah austenit dan sementit, kemudian didinginkan dengan cepat agar diperoleh martensit yang halus dan karbida-karbida yang tidak larut. Struktur hasil *quench* memiliki kekerasan yang sangat tinggi dibandingkan dengan martensit. Jika karbida yang larut dalam austenit terlalu sedikit, kekerasan hasil *quench* akan tinggi. Jumlah karbida yang dapat larut dalam austenit sebanding dengan temperatur austenisasinya. Jumlah karbida yang larut akan meningkat jika temperatur austenisasinya dinaikkan. Jika karbida yang terlarut terlalu besar, akan terjadi peningkatan ukuran butir disertai dengan turunnya kekerasan dan ketangguhan (lihat Gambar 11.5).



Gambar 8.5 : Grafik hubungan antara Temperatur, kekerasan dan kandungan austenit (Suratman, 1994)

3.2. Tahapan Pekerjaan Sebelum Proses *Quenching*

Benda kerja yang akan dikeraskan terlebih dahulu dibersihkan dari terak, oli dan sebagainya, hal ini dilakukan agar kekerasan yang diinginkan dapat dicapai. Benda kerja yang memiliki lubang, jika perlu, terutama baja-baja perkakas, harus ditutup dengan tanah liat, asbes atau baja insert sehingga tidak terjadi pengerasan pada lubang tersebut. Hal ini tidak perlu seandainya ukuran lubang cukup besar serta cara quench yang tertentu sehingga permukaan di dalam lubang dapat dikeraskan dengan baik.

Baja karbon dan baja paduan rendah dapat dipanaskan langsung sampai ke temperatur pemanasannya tanpa memerlukan adanya pemanasan awal (*pre-heat*). sedangkan benda kerja yang besar dan bentuknya rumit dapat dilakukan pemanasan awal untuk mencegah distorsi dan retak akibat tidak

homogennya temperatur di bagian tengah dengan dibagian permukaan. Pemanasan awal biasanya dilakukan terhadap baja-baja perkakas karena konduktifitas panas baja tersebut sangat rendah.

0

Pemanasan awal biasanya 500 - 600 C, pada temperatur ini tegangan dalam yang berkembang akibat tidak homogennya pemanasan dipermukaan dan di bagian tengah sedikit-demi sedikit dapat dihilangkan. Setelah itu, pemanasan diatas temperatur tersebut dapat dilakukan dengan laju pemanasan yang relatif cepat. Pemanasan awal juga diperlukan jika temperatur pengerasannya tinggi, karena manahan benda kerja pada temperatur tinggi dalam waktu singkat dapat memperkecil terbentuknya terak dan dekarburasi. Benda kerja yang rumit bentuknya atau baja-baja paduan tinggi harus diberi pemanasan awal dua kali sebelum mencapai temperatur austenisasinya.

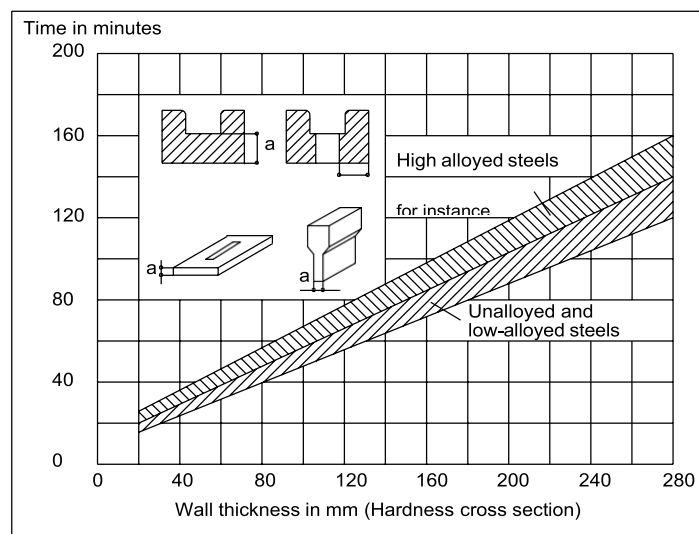
Penting untuk diketahui bahwa benda kerja yang akan dikeraskan harus memiliki struktur yang homogen dan halus. Jika benda kerja yang akan dikeraskan memiliki struktur yang kasar setelah dikeraskan akan diperoleh kekerasan yang tidak homogen, distorsi dan retak pada saat dipanaskan maupun pada saat *diquench*. Agar dijamin hasil dengan kekerasan yang tinggi dan seragam dari baja-baja perkakas setelah pengerasan, maka baja-baja sebelum dikeraskan harus memiliki struktur yang lamelar dan bukan globular. Hal ini dikarenakan proses transformasi dari suatu struktur yang globular ke austenit relatif lebih lambat dibanding dari perlit ke austenit. Dengan demikian baja dengan struktur globular juga tidak akan memiliki kedalaman pengerasan yang tinggi.

3.3. Lama Pemanasan

Waktu yang diperlukan untuk mencapai temperatur pengerasan tergantung pada beberapa faktor seperti jenis tungku dan jenis elemen pemanasnya. Lama pemanasan pada temperatur pengerasannya tergantung jenis baja dan

temperatur pemanasan yang dipilih dari rentang temperatur yang telah ditentukan untuk jenis baja yang bersangkutan. Dalam banyak hal, umumnya dipilih temperatur pengerasan yang tertinggi dari rentang temperatur pengerasan yang sudah ditentukan. Tetapi jika penampang-penampang dari benda kerja yang diproses menunjukkan adanya perbedaan yang besar, umumnya dipilih temperatur pengerasan yang rendah.

Pada kasus yang pertama, lama pemanasannya lebih lama dibandingkan dengan lama pemanasan pada kasus kedua. Untuk mencegah timbulnya pertumbuhan butir, baja-baja yang tidak dipadu dan baja paduan rendah, lama pemanasannya harus diupayakan lebih singkat dibanding baja-baja paduan tinggi seperti baja *hot worked* yang memerlukan waktu yang cukup untuk melarutkan karbida-karbida yang merupakan faktor yang penting dalam mencapai kekerasan yang diinginkan. Diagram yang tampak pada Gambar 11.6, dapat dijadikan pegangan untuk menentukan lama pemanasan untuk baja-baja konstruksi dan perkakas setelah temperatur pengerasannya dicapai.

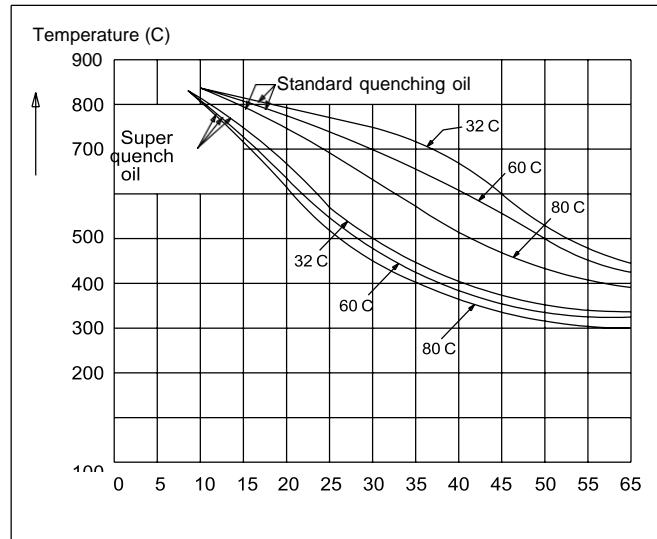


Gambar 8.6 : Grafik lama pemanasan dengan tebal dinding dari benda kerja yang dihardening (Suratman,1994).

3.4. Media *Quenching*

Tujuan utama dari proses pengerasan adalah agar diperoleh struktur martensit yang keras, sekurang-kurangnya di permukaan baja. Hal ini hanya dapat dicapai jika menggunakan medium *quenching* yang efektif sehingga baja didinginkan pada suatu laju yang dapat mencegah terbentuknya struktur yang lebih lunak seperti perlit atau bainit. Tetapi berhubung sebagian besar benda kerja sudah berada dalam tahap akhir dari proses, maka kualitas medium *quenching* yang digunakan harus dapat menjamin agar tidak timbul distorsi pada benda kerja setelah proses *quench* selesai dilaksanakan. Hal tersebut dapat dicapai dengan cara menggunakan media *quenching* yang sesuai tergantung pada jenis baja yang diproses, tebal penampang dan besarnya distorsi yang diijinkan. Untuk baja karbon, medium *quenching* yang digunakan adalah air, sedangkan untuk baja paduan medium yang disarankan adalah oli.

Quench ke dalam oli saat ini paling banyak digunakan, manfaat dari pendinginannya oli adalah bahwa laju pendinginannya pada tahap pembentukan lapisan uap dapat dikontrol sehingga dihasilkan karakteristik *quenching* yang homogen. Laju pendinginan untuk baja yang *diquench* di oli relatif rendah karena tingginya titik didih dari oli. Memanaskan oli sampai sekitar 40 - 100 C sebelum proses *quenching* akan meningkatkan laju pendinginan (lihat Gambar 11.7).



Gambar 8.7: Pengaruh suhu oli pada kecepatan *quenching* (Thelning,1984).

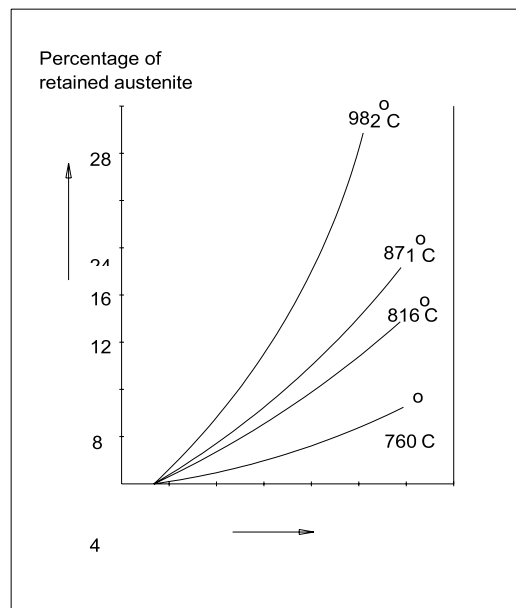
Dengan ditingkatkannya temperatur oli akan menjadikan oli lebih encer sehingga meningkatkan kapasitas pendinginannya. Faktor-faktor yang mengatur penyerapan panas dari benda kerja adalah panas spesifik, konduktivitas termal, panas laten penguapan dan viskositas oli yang digunakan. Umumnya makin rendah viskositas makin cepat laju pendinginannya. Temperatur maksimum dari oli yang digunakan harus 25 C dibawah titik didih oli yang bersangkutan (Suratman,1994).

3.5. Pengaruh Unsur Paduan Pada Pengerasan

Sifat mekanik yang diperoleh dari proses perlakuan panas terutama tergantung pada komposisi kimia. Baja merupakan kombinasi Fe dan C. Disamping itu, terdapat juga beberapa unsur yang lain seperti Mn, P, S dan Si yang senantiasa ada meskipun sedikit, unsur-unsur ini bukan unsur pembentuk karbida . Penambahan unsur-unsur paduan seperti Cr, Mo, V, W, T dapat menolong untuk mencapai sifat-sifat yang diinginkan, unsur-unsur ini merupakan unsur pembentuk karbida yang kuat.

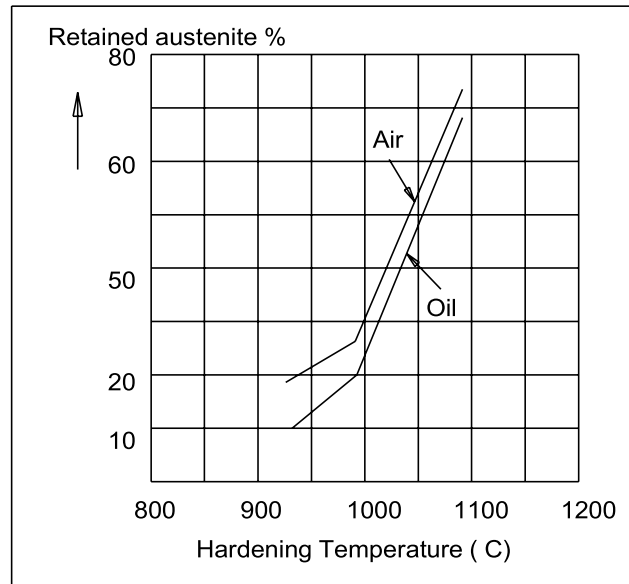
3.6. Pembentukan Austenit Sisa

Austenit akan bertransformasi menjadi martensit jika didinginkan ke temperatur kamar dengan laju pendinginan yang tinggi, sementara itu masih ada sebagian yang tidak turut bertransformasi yang disebut sebagai austenit sisa. Dimana sejumlah austenit sisa yang terbentuk akan semakin meningkat dengan meningkatnya kadar karbon (lihat Gambar 11.8).



Gambar 8.8: Hubungan antara kadar karbon dengan austenit sisa (Suratman,1994).

Kadar karbon yang tinggi akan menurunkan garis Ms, sehingga jumlah austenit sisanya akan semakin banyak. Selain itu juga pengaruh temperatur pengerasan juga akan menurunkan temperatur Ms (martensit start), sehingga jumlah austenit sisa akan semakin banyak dengan naiknya suhu austenisasi (lihat Gambar 11.9).



Gambar 8.9 : Hubungan antara temperatur pengerasan dengan jumlah austenit sisa yang terbentuk (Purwanto,1995)

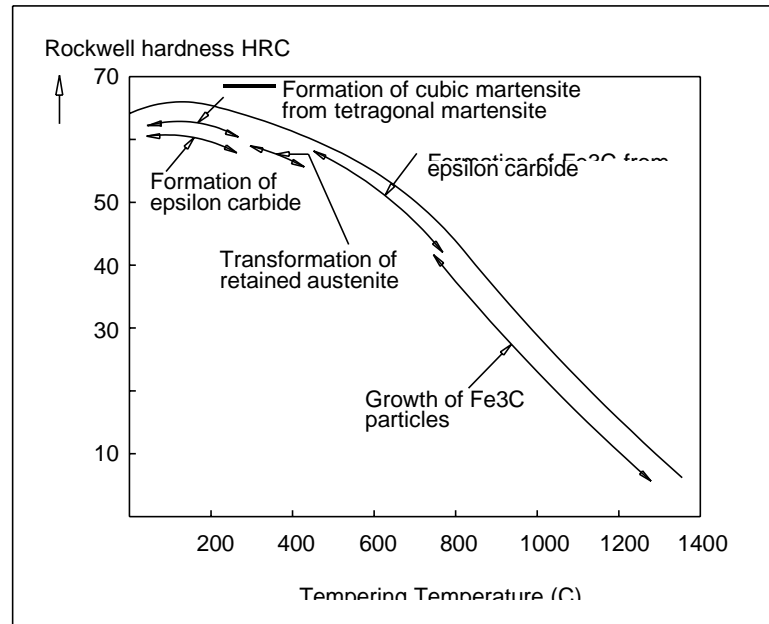
4. *Tempering*

Proses memanaskan kembali baja yang telah dikeraskan disebut proses temper. Dengan proses ini, duktilitas dapat ditingkatkan namun kekerasan dan kekuatannya akan menurun. Pada sebagian besar baja struktur, proses temper dimaksudkan untuk memperoleh kombinasi antara kekuatan, duktilitas dan ketangguhan yang tinggi. Dengan demikian, proses temper setelah proses pengerasan akan menjadikan baja lebih bermanfaat karena adanya struktur yang lebih stabil.

4.1. Perubahan Struktur Selama Proses Temper

Proses temper terdiri dari memanaskan baja sampai dengan temperatur di bawah A_1 , dan menahannya pada temperatur tersebut untuk jangka waktu tertentu dan kemudian didinginkan di udara. Hasil penelitian menunjukkan

bahwa pada saat temperatur dinaikkan, baja yang dikeraskan akan mengalami 4 tahapan yaitu (lihat Gambar 11.10):



Gambar 8.10: Perubahan kekerasan dan struktur selama *tempering* (Suratman,1994)

0

1. Pada temperatur 80 dan 200 C, suatu produk transisi yang kaya akan karbon yang dikenal sebagai karbida, berpresipitasi dari martensit tetragonal sehingga menurunkan tetragonalitas martensit atau bahkan mengubah martensit tetragonal menjadi ferit kubik. Periode ini disebut sebagai proses temper tahap pertama. Pada saat ini, akibat keluarnya karbon, volume martensit berkonstraksi. Karbida yang terbentuk pada periode ini disebut sebagai karbida epsilon.

0

2. Pada temperatur antara 200 dan 300 C, austenit sisa mengurai menjadi suatu produk seperti bainit. Penampilannya mirip martensit temper. Periode ini disebut sebagai proses temper tahap kedua. Pada tahap ini volume baja meningkat.

0

3. Pada temperatur antara 300 dan 400 C terjadi pembentukan dan pertumbuhan sementit dari karbida yang berpresipitasi pada tahap pertama dan kedua. Periode ini disebut sebagai proses temper tahap ketiga. Periode ini ditandai dengan adanya penurunan volume dan melampaui efek yang ditimbulkan dari penguraian austenit pada tahap kedua.

0

4. Pada temperatur antara 400 dan 700 C pertumbuhan terus berlangsung dan disertai dengan proses sferodisasi dari sementit. Pada temperatur yang lebih tinggi lagi, terjadi pembentukan karbida kompleks pada baja-baja yang mengandung unsur-unsur pembentuk karbida yang kuat. Periode ini disebut sebagai proses temper tahap keempat.

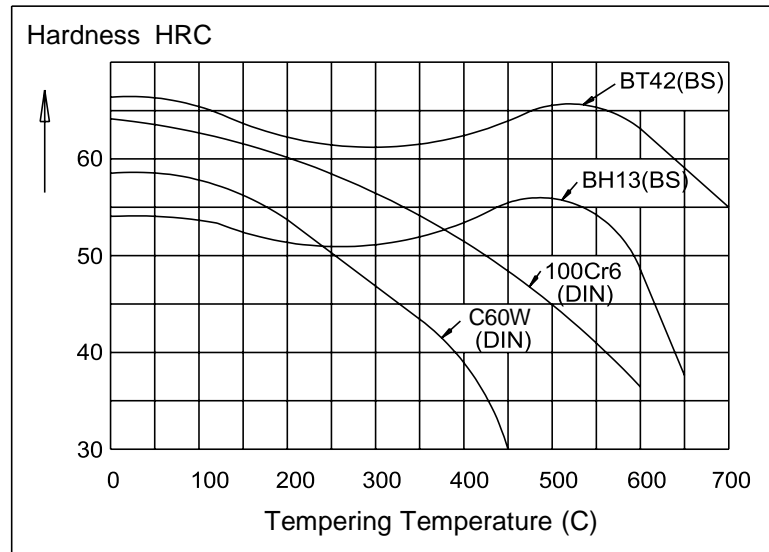
Perlu diketahui bahwa rentang temperatur yang tertera pada setiap tahap proses temper, adalah spesifik. Dalam praktek, rentang temperatur tersebut bervariasi tergantung pada laju pemanasan, lama penemperan, jenis dan sensitivitas pengukuran yang digunakan. Disamping itu juga tergantung pada komposisi kimia baja yang diproses.

4.2. Pengaruh Unsur Paduan Pada Proses Temper

Jika baja dipadu, interval diantara tahapan proses temper akan bergeser kearah temperatur yang lebih tinggi, dan itu berarti martensit menjadi lebih tahan terhadap proses penemperan. Unsur-unsur pembentuk karbida, khususnya : Cr, Mo, W, Ti dan V dapat menunda penurunan kekerasan dan kekuatan baja meskipun temperatur tempemnya dinaikkan. Dengan jenis dan jumlah yang tertentu dari unsur-unsur tersebut diatas, dimungkinkan bahwa

0

penurunan kekerasan dapat terjadi pada temperatur antara 400 dan 600 C, dan dalam beberapa hal, dapat juga terjadi peningkatan kekerasan. Gambar 11-11 menggambarkan fenomena di atas.



Gambar 8-11 : Pengaruh *tempering* pada baja paduan (Suratman,1994).

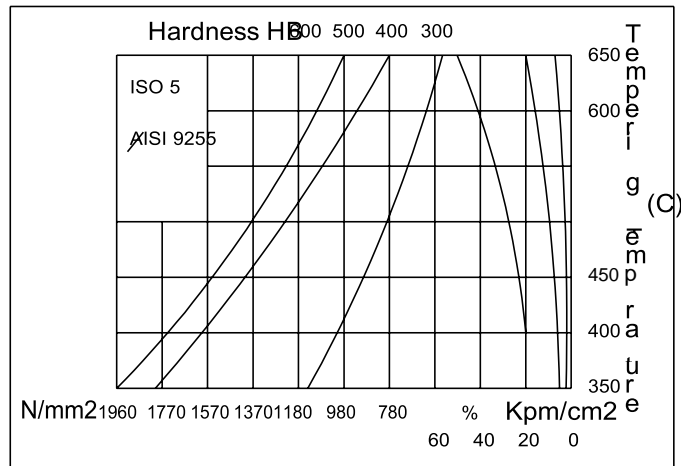
Pengaruh unsur paduan terhadap penurunan kekerasan diterangkan dengan presipitasi karbon dari martensit pada temperatur temper yang lebih tinggi. Dilain pihak, peningkatan kekerasan pada temperatur temper yang lebih tinggi (*secondary hardening*) pada baja-baja yang mengandung W, Mo dan V disebabkan oleh adanya transformasi austenit sisa menjadi martensit.

Pada baja yang mengandung Cr yang tinggi, austenit sisa bertransformasi menjadi martensit pada saat didinginkan dari temperatur temper sekitar 500 C. Peningkatan kekerasan sebagai akibat dari adanya transformasi austenit sisa menjadi martensit merupakan hal yang umum terjadi pada baja-baja paduan tinggi, namun sangat jarang terjadi pada baja-baja karbon dan baja paduan rendah karena jumlah austenit sisanya relatif sedikit. Sedangkan pada baja paduan tinggi jumlah austenit sisanya mencapai lebih dari 5 - 30% (Suratman,1994).

4.3. Perubahan Sifat Mekanik

Tempering dilaksanakan dengan cara mengkombinasikan waktu dan temperatur. Proses temper tidak cukup hanya dengan memanaskan baja yang dikeraskan sampai pada temperatur tertentu saja. Benda kerja harus ditahan pada temperatur temper untuk jangka waktu tertentu. Proses temper dikaitkan dengan proses difusi, karena itu siklus penemperan terdiri dari memanaskan benda kerja sampai dengan temperatur dibawah A_1 dan menahannya pada temperatur tersebut untuk jangka waktu tertentu sehingga perubahan sifat yang diinginkan dapat dicapai. Jika temperatur temper yang digunakan relatif rendah maka proses difusinya akan berlangsung lambat. Baja karbon, baja paduan medium dan baja karbon tinggi, pada saat dipanaskan sekitar $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ kekerasannya akan menurun 1-3 HRC akibat adanya penguraian martensit tetragonal menjadi martensit lain (martensit temper) dan karbida epsilon.

Peningkatan lebih lanjut temperatur *tempering* akan menurunkan kekerasan, kekuatan tarik dan batas luluhnya sedangkan elongasi dan pengecilan penampangnya meningkat. Gambar 11-12 menggambarkan perubahan sifat mekanik baja yang dikeraskan dikaitkan dengan proses penemperan. Umumnya makin tinggi temperatur temper, makin besar penurunan kekerasan dan kekuatannya dan makin besar pula peningkatan keuletan dan ketangguhannya. Tempering pada temperatur rendah $150\text{-}230\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Amstead B.H.) bertujuan meningkatkan kekenyalan / keuletan tanpa mengurangi kekerasan. Tempering pada temperatur tinggi $300\text{-}675\text{ }^{\circ}\text{C}$ meningkatkan kekenyalan / keuletan dan menurunkan kekerasan.

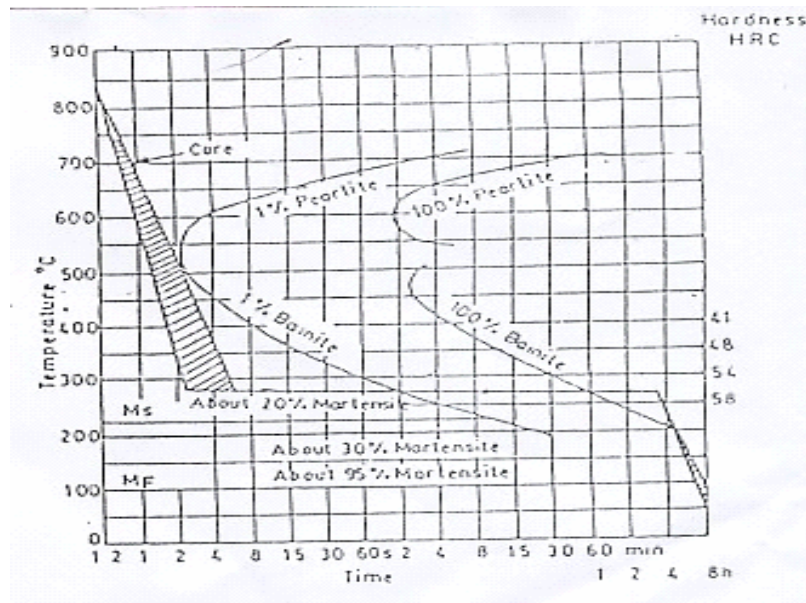


Gambar 8-12: Pengaruh temperatur *tempering* terhadap sifat mekanis

5. *Austempering*

Austempering dapat diterapkan untuk beberapa kelas baja kekuatan tinggi yang harus memiliki ketangguhan dan keuletan tertentu. Komponen yang mengalami proses ini akan memiliki ketangguhan yang lebih tinggi, kekuatan impaknya menjadi lebih baik, batas lelehnya dan keuletannya meningkat dibanding dengan kekerasan yang sama hasil dari proses quench konvensional.

Austempering dilakukan dengan cara mengquench baja dari temperatur austenisasinya ke dalam garam cair yang temperaturnya sedikit di atas temperatur M_s nya. Lama penahan di dalam cairan garam adalah sehingga seluruh austenit bertransformasi menjadi bainit. Setelah itu baja didinginkan di udara sampai ke temperatur kamar seperti terlihat pada gambar 11.13 dengan waktu penahan bervariasi 5 sampai dengan 30 menit atau 1 jam pada temperatur austempering 250 – 270 °C. tetapi temperatur perlakuan dan lama penahan yang tepat harus ditentukan dari diagram transformasi yang sesuai dengan baja yang akan di austempering.



Gambar 8.13 :. Diagram temperatur austempering terhadap

Kekerasan bainit yang diperoleh dari transformasi pada suatu kondisi tertentu secara kasar identik dengan kekerasan martensit yang ditemper pada temperatur yang sama. Kekerasan bainit dipengaruhi oleh komposisi kimia baja dan oleh temperatur cairan garam dengan demikian proses austemper dapat di atur dengan cara mengatur temperatur austemper.

Austempering dilaksanakan dalam tungku garam agar pengontrolan temperaturnya dapat dilakukan dengan cermat sehingga kekerasan yang akan dihasilkannya memiliki tingkat kehomogenan yang tinggi. Jika temperatur tungku garam makin rendah, kapasitas pendinginannya akan semakin tinggi. Penambahan 1- 2% air dapat meningkatkan kapasitas pendinginan dari cairan garam pada temperatur 400°C dan kira – kira 4 kali lebih besar dari pada air garam yang digunakan 45 – 55% Natrium Nitrat dan 45 – 55 % Kalium Nitrat. Garam – garam ini mudah larut dalam air sehingga mudah sekali untuk membersihkan benda kerja. Garam ini secara efektif digunakan pada rentang temperatur 200 – 500 °C.

Delay quenching adalah istilah yang diterapkan pada proses quenching dimana komponen setelah dikeluarkan dari tungku pada temperatur pengerasannya dibiarkan beberapa saat sebelum di quench. Ini dimaksudkan agar proses quench terjadi pada temperatur lebih rendah sehingga memperkecil kemungkinan timbulnya distorsi. Cara ini lazim diterapkan pada HSS, baja hot worked dan baja – baja yang dikeraskan permukaannya.

Tujuan utama dari proses pengerasan adalah agar diperoleh struktur martensit yang keras, sekurang – kurangnya di permukaan baja. Hal ini dapat dicapai jika menggunakan media quenching yang efektif sehingga baja didinginkan pada suatu laju yang dapat mencegah terbentuknya struktur yang lebih lunak seperti perlit atau bainit.

Pemilihan medium quenching untuk mengeraskan baja tergantung pada laju pendinginan yang diinginkan agar dicapai kekerasan tertentu. Fluida yang ideal untuk mengquench baja agar diperoleh struktur martensit harus bersifat:

1. Mengambil panas dengan cepat di daerah temperatur yang tinggi agar pembentukan perlit dapat dicegah.
2. Mendinginkan benda kerja relatif lambat di daerah temperatur yang rendah; misalnya di bawah temperatur 350°C agar distorsi atau retak dapat dicegah.

Terjadinya retak panas atau distorsi selama proses *quench* dapat disebabkan oleh kenyataan bagian luar benda kerja lebih dingin dibanding bagian dalam, dan bagian permukaan adalah yang pertama mencapai kondisi *quench* sedangkan bagian di sebelah dalamnya mendingin dengan laju pendinginan yang relatif lebih lambat. Adanya perubahan volume di bagian tengah sebagai hasil proses pendinginan akan menimbulkan tegangan termal atau retak – retak di luar bagian benda kerja. Karena itu benda kerja disarankan tidak boleh terlalu cepat melampaui daerah

pembentukan martensit dan agar sedikit diluahkan waktu untuk menghilangkan tegangan.

Media quenching dengan garam disebut dengan Salt Bath. Campuran Nitrat dan Nitrit terutama digunakan untuk mengquench benda kerja pada temperatur yang relatif rendah. Garam – garam tersebut dapat digunakan pada rentang temperatur 150 – 500⁰C. Pada temperatur di atas 500⁰C dapat menyebabkan oksidasi yang kuat dan menyebabkan pitting pada permukaan baja, disamping dapat menimbulkan ledakan. Karena itu perlu diperhatikan agar temperatur kerja dari garam tidak dilampaui. Seperti yang diperlihatkan pada tabel garam – garam untuk proses *quench* di bawah ini:

Tabel 11.1 Garam- garam untuk proses *Quench*

Komposisi Garam	Titik Cair (°C)	Rentang Operasi (°C)
40–50% NaNO ₂ + 50–60% NaNO ₃	143	160-500
40–50% NaNO ₃ + 50–60% KNO ₃	225	230-550
100% KNO ₃	337	350-500
100% NaNO ₃	370	400-600
50% BaCl + 20% NaCl + 30% KCl	540	570-900
80% NaOH + 20% KOH + ^H ₂ O	140	160-200
40–50% KOH + 50–55% NaOH	400	300-400
45–55% CaCl ₂ + 25–30% BaCl ₂ + 15 – 25% NaCl	530	550-650

BAB.IX. : PERLAKUAN PERMUKAAN

Proses perlakuan yang diterapkan untuk mengubah sifat pada seluruh bagian logam dikenal dengan nama proses perlakuan panas / laku panas (*heat treatment*). Sedangkan proses perlakuan yang diterapkan untuk mengubah sifat / karakteristik logam pada permukaannya (bagian permukaan logam) disebut proses perlakuan permukaan / laku permukaan (*surface treatment*).

Pada implementasinya, pelaksanaan perlakuan permukaan sangat bervariasi tergantung pada tujuan yang ingin dicapai, dan pada umumnya perlakuan permukaan dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan ketahanan aus dengan jalan memperkeras atau memberikan lapisan yang keras pada permukaan logam.

Meningkatkan ketahanan korosi tanpa merubah karakteristik sifat-sifat logam yang permukaannya diberi laku panas akan meningkatkan unjuk kerja (*performance*) logam dari suatu komponen untuk maksud-maksud fabrikasi.

Jenis-jenis perlakuan permukaan yang umum dikenal pada proses produksi adalah :

- a. Proses-proses untuk memperkeras permukaan logam.
 1. Proses perlakuan termokimia (*thermochemical treatment*)
 - Karburasi (media padat, cair, atau gas)
 - Nitridasi (media cair, atau gas)
 - Karbonitridasi (*Nitroc*)
 2. Proses pengerasan permukaan (*surface hardening*)
 - Pengerasan nyala (*flame hardening*)
 - Pengerasan Induksi (*induction hardening*)
 3. *Metal Spraying*
 4. Pelapisan logam (*metal plating*)
 5. Proses Fusi (*fusion process*)

- a. Proses-proses untuk meningkatkan ketahanan korosi
 - 1. Pengendapan listrik (*electrodeposition*)
 - 2. Lapis celup (*hot dip coating*)
 - 3. Lapis Difusi (*diffusion coating*)
 - Cementasi
 - *Cladding*
 - Deposisi vacum
 - Pirolysa (*Vapour deposition*)
 - *Sprayed metal coating*
 - Pengerasan kulit (*case hardening*)
 - 4. Lapis non metalik (*non- metallic coating*) mencakup :
 - Pengecatan dan lapis lak (*lacquers coating*)
 - Lapis plastik
 - Lapis karet dan elastomer
 - Lapis enamel
 - *Temporary protective coatings*
 - 5. Lapis konversi dan oksida (*Conversion and oxidcoatings*)
 - Anodisasi
 - Chromatasi
 - Phosphatasi (*Parkerizing*)

- a. Proses-proses untuk meningkatkan unjuk rupa :
 - *Polishing*
 - *Abrashive belt grinding*
 - *Barrel tumbling*
 - *Honing*
 - *Lapping*
 - *Super finishing*
 - *Electroplating*
 - *Metal spraying*

- Pelapisan inorganik
- *Parkerizing*
- *Anodizing*
- *Sheradizing*

9.1. Karburasi

Proses karburasi biasanya digunakan untuk meningkatkan kekerasan permukaan baja karbon rendah, dengan jalan memanaskan baja di atas suhu A_1 ($> 723^{\circ} C$) dalam suasana lingkungan karbon (gas CO), sehingga terjadi reaksi :



Dimana $Fe_{(c)}$ merupakan karbon yang terlarut dalam austenit dipermukaan baja, dan meningkatnya kadar karbon disebabkan oleh pemanasan yang mengakibatkan terjadinya difusi karbon sampai kedalaman tertentu sesuai dengan keinginan, dan selanjutnya didinginkan dengan cepat ke dalam air.

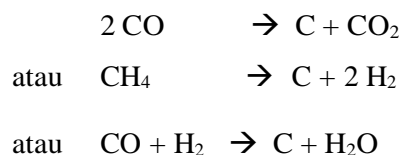
Hal ini mengakibatkan struktur dipermukaan baja akan terbentuk perlit dan sementit halus, pada daerah interzone terdiri dari perlit, sedangkan pada bagian inti berstruktur perlit dan ferit.

Karburasi cocok untuk benda-benda kecil dan sedang, dengan keuntungan bebas oksidasi, kedalaman lapisan dan kandungan karbon merata, laju penetrasi cepat, tetapi baja hasil proses ini perlu dicuci agar terhindar korosi dan proses ini memerlukan pengontrolan dan pengaturan komposisi bath harus terus menerus, serta larutan cyanida yang digunakan beracun dan berbahaya.

Hasil proses ini perlu dilanjutkan dengan perlakuan panas, karena pencelupan cepat dari temperatur austenit dengan kondisi butir kasar akan menyebabkan baja menjadi getas dan terjadi distorsi, maka proses perlakuan panas lanjutan ini dilakukan untuk mendapatkan butir yang halus.

Karburasi dengan menggunakan media padat dinamakan Pack Karburasi, dengan metode sampel dalam jumlah banyak dimasukkan kedalam kotak yang terbuat dari baja tahan panas (20% Cr – 20% Ni) yang dilapisi secara bergantian dengan karbon (batu bara dan arang kayu). Kemudian dipanaskan pada temperatur 900⁰ s.d 925⁰C dan kemudian dicelupkan ke dalam air untuk mendapatkan ketebalan 0,4 mm, serta dicelupkan ke dalam air dari temperatur 800⁰ s.d 820⁰C untuk memperoleh ketebalan 0,4 s.d 1,25 mm. Proses pack karburasi sederhana tanpa memerlukan atmosfer, tetapi proses ini tidak cocok untuk benda-benda yang tipis.

Gas Karburasi adalah proses karburasi dengan menggunakan media gas yang sesuai untuk baja karbon rendah, dengan metode sampel dipanaskan pada temperatur 900⁰ s.d 940⁰C dalam media gas hidrokarbon (gas alam atau metan propan), sehingga karbon bebas C akan berdifusi ke permukaan baja dengan kedalaman 0,1 s.d 0,75 mm (lebih tipis dari pada metode pack karburasi) dengan reaksi :



Pencelupan dilakukan setelah proses difusi berakhir ke dalam media pendingin yang sesuai.

Karburasi Cair merupakan karburasi dengan menggunakan media cair, dengan metode sampel diberi penamasan awal pada suhu sekitar 100⁰ s.d 400⁰C dan kemudian dimasukkan ke dalam bath berisikan cairan garam cyanida dengan suhu proses sekitar 900⁰ s.d 925⁰C dengan tebal lapisan sekitar 0,5 mm. Pada suhu proses yang lebih tinggi dari 950⁰C akan mengakibatkan kekerasan permukaan menjadi lebih rendah, karena semakin banyaknya austenit sisa.

9.1. Nitridasi

Nitridasi digunakan untuk meningkatkan kekerasan permukaan baja paduan, dengan cara memanaskan baja paduan pada temperatur 500^o s.d 590^oC di dalam kontainer yang lingkungannya nitridasi yang membuat amoniak akan terurai menjadi gas Nitrogen dan H₂. Nitrogen bebas akan bereaksi / berdifusi dengan paduan baja atau dengan ferit membentuk nitrida dipermukaan baja.

Kedalaman lapisan nitrida mencapai 0,7 mm pada temperatur 510^oC dengan lama pemanasan 80 jam, permukaan produk akan menjadi tahan aus, karena kekerasan yang tinggi, tahan fatik, tahan temper, tahan korosi.

9.2. Karbonitridasi

Proses karbonitridasi biasanya digunakan untuk meningkatkan kekerasan permukaan baja karbon rendah, dengan jalan memanaskannya dalam lingkungan gas karbon-nitrogen dengan suhu yang lebih rendah dari temperatur karburasi yaitu sekitar 750 s.d. 890^oC, dengan kedalaman lapisan sekitar 0,7 mm.

Karbon dan nitrogen bebas yang terbentuk akibat pemanasan akan terdifusi kepermukaan baja bereaksi dengan ferit atau paduan lainnya. Lapisan karbonitridasi lebih tahan terhadap pelunakan sewaktu temper dibanding lapisan hasil karburasi.

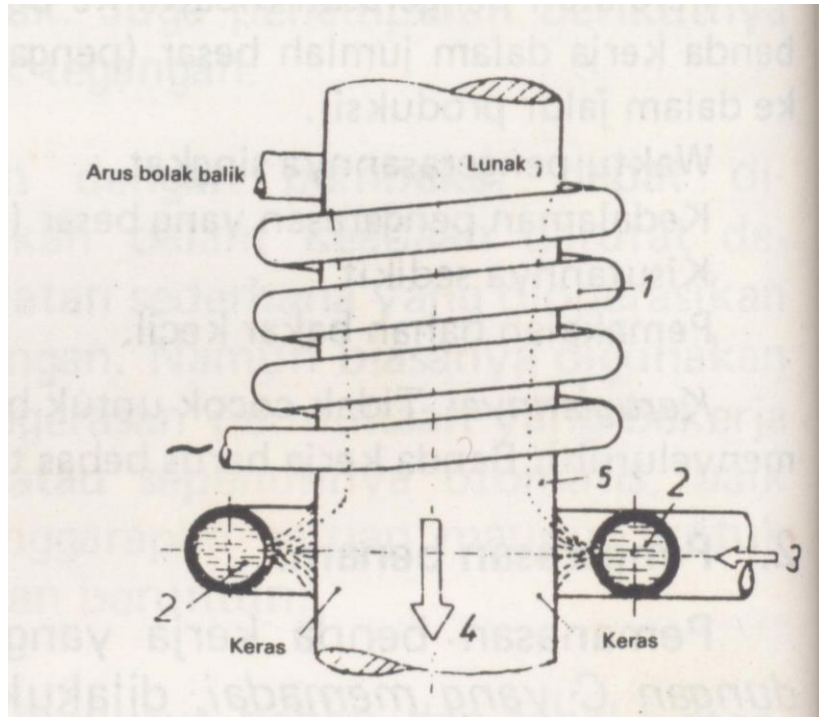
9.3. Induction Hardening

Berbeda dengan tiga proses sebelumnya pengerasan induksi tidak mengalami perubahan komposisi kimia di permukaannya, zona yang dikeraskan permukaannya dipanaskan hingga temperatur austenisasi lalu didinginkan dengan cepat sehingga membentuk struktur martensit. Baja

yang dikeraskan harus mempunyai sifat mampukeras (*hardenability*) yang baik seperti baja dengan kandungan karbon sekitar 0,3 sampai 0,6 %.

Pemanasan pada proses pengerasan induksi diperoleh dari arus bolak-balik berfrekuensi tinggi berasal dari konverter oscilator yang selanjutnya didinginkan dengan cepat (seperti terlihat pada gambar 4.1). Arus bolak-balik dengan frekuensi tinggi (10.000 sampai 50.000 Hz) ini mengakibatkan timbulnya arus Eddy dalam lapisan permukaan logam yang kemudian berubah menjadi panas. Sedangkan kedalaman pemanasan tergantung kepada daya dan frekuensi arus listrik.

Baja karbon sedang dan baja paduan berbentuk komponen seperti *piston rod, pump shaft, cams, dan spur gears* dapat dikeraskan dengan metoda ini dengan keuntungan prosesnya otomatis melalui setting waktu frekuensi dengan waktu pemanasan lebih cepat, dapat dilakukan pengerasan setempat dengan peningkatan kekuatan fatik dan sedikit deformasi. Tetapi proses ini membutuhkan biaya yang mahal untuk mesin dan biaya pemeliharaan, dengan keterbatasan kuantitas komponen sedikit, bentuk benda dan jenis baja yang dikeraskan terbatas.



Gambar 9.1: Proses Pengerasan Induksi

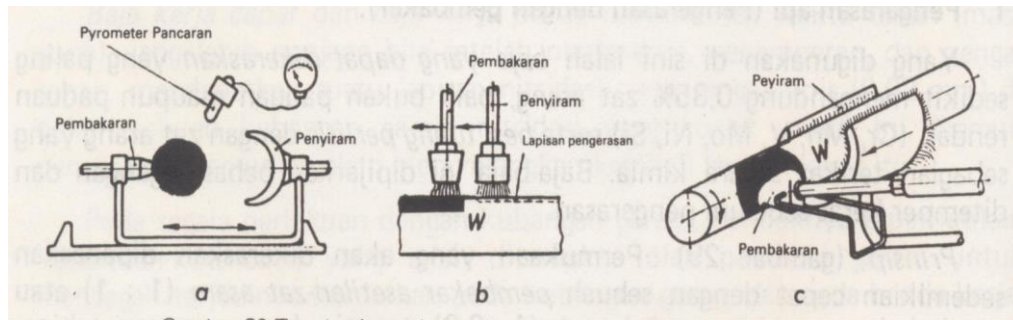
9.4.Flame Hardening

Proses *flame hardening* sama dengan pengerasan induksi, tetapi sumber panasnya berasal dari nyala api (*torch*) pembakaran Oxy-Asetilen, propane oksigen atau gas alam seperti terlihat pada gambar 4.2.

Kesulitan pengerasan nyala api adalah pada kontrol nyala yang dapat memungkinkan terjadinya *overheating* dan oksidasi benda kerja. Proses ini biasanya digunakan untuk meningkatkan kekerasan permukaan komponen mesin perkakas seperti roda gigi, *crankshaft*, dan *pons*. Pada proses ini hal-hal yang harus diperhatikan adalah :

1. Zona yang dipanaskan harus bersih dan bebas dari kerak.
2. Keseimbangan campuran gas oksigen dengan asetilen untuk mendapatkan nyala netral dan stabil.
3. Laju atau kecepatan pemanasan diusahakan tetap atau stabil

4. Sebaiknya dilanjutkan dengan proses temper, untuk mengurangi kegetasan.



Gambar 9.2: Proses Pengerasan Nyala Api

BAB.X. MEKANISME PENGUATAN

Deformasi plastik kristal tunggal dalam hubungannya dengan gerakan dislokasi dan dengan mekanisme deformasi dasar untuk luncur dan untuk bentuk kembaran kristal tunggal menggambarkan kondisi paling ideal untuk kuliah lebih mendalam. Penyederhanaan yang diakibatkan oleh kondisi kristal tunggal dari segi bahan membantu dalam melukiskan perilaku deformasi dalam kaitannya dengan kristalografi dan dengan struktur cacat. Terkecuali untuk alat elektronik zat padat (solid-state electronic devices), kristal tunggal jarang dipakai untuk penerapan rekayasa disebabkan oleh pembatasan yang melibatkan kekuatan, ukuran dan pembuatannya. Produk logam komersial tanpa terkecuali tersusun dari kristal individual atau dari butir individual dalam jumlah sangat banyak. Butir individual agregat polikristalin tidak mengalami perubahan bentuk sesuai hukum yang relatif sederhana, yang melukiskan deformasi plastik dalam kristal disebabkan oleh dampak penahanan butir yang mengelilinginya.

Membahas hubungan dasar perilaku dislokasi. Dari sini jelas, bahwa kekuatan berbanding terbalik dengan mobilitas dislokasi dan bahwa dalam kristal tunggal dengan kemurniaan tinggi terdapat sejumlah faktor yang mungkin, dapat mempengaruhi kekuatan perilaku mekanis. Jadi, struktur kristal menentukan jumlah dan jenis sistem luncur, menetapkan vektor Burgers dan menentukan tegangan gesekan kisi (tegangan Peierls) yang mengatur tingkat kekuatan dasar dan ketergantungan kekuatan dari temperatur. Dalam struktur padat, energi salah-susun menentukan luasnya disosiasi dislokasi, yang mempengaruhi mudahnya luncur-silang dan besarnya laju penguatan-regang selanjutnya. Kemurnian dan metode persiapan menentukan kerapatan dan: dislokasi awal dan substruktur. Variabel yang terbatas ini mengetengahkan kepelikan bahwa perilaku mekanis pada umumnya tidak dapat dikaitkan sebagai fungsi regangan, laju regangan, temperatur, dan laju tegangan dengan presisi tinggi.

Tetapi, diperlukan kepelikan yang semakin besar untuk menghasilkan bahan dengan kekuatan serta kegunaan tertinggi. Jadi butir halus sering dikehendaki untuk kekuatan tinggi, penambahan atom-larut dalam jumlah besar untuk meningkatkan kekuatan dan transformasi fase dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kekuatan.

10.1. BATAS BUTIR DAN DISLOKASI

Batas antara butir-butir dalam agregat polikristalin merupakan daerah kisi yang terganggu dengan lebar hanya beberapa garis tengah atom. Dalam hal umum, orientasi kristalografi berubah dengan tiba-tiba melintasi perbatasan butir dari satu butir ke butir berikutnya. Batas butir sudut besar biasa menggambarkan daerah salah-suai rambang (random misfit) antara kisi kristal di sekitarnya. Selama perbedaan dalam orientasi antara butir di kiri kanan perbatasan berkurang, keadaan tertib di perbatasan meningkat. Untuk hal batas butir sudut rendah, di mana perbedaan orientasi sepanjang perbatasan mungkin kurang dari 1° , perbatasan terdiri dari susunan dislokasi yang teratur.

Batas butir sudut besar merupakan perbatasan dengan energi permukaan yang agak tinggi. Umpamanya, perbatasan butir dalam tembaga mempunyai energi permukaan antar bidang kira-kira sebesar 600 erg/cm^2 , sedang energi batas bentuk kembaran hanya kira-kira 25 erg/cm^2 . Disebabkan oleh energinya yang tinggi, batas butir merupakan tempat potensial untuk reaksi bahan padat (solid state reactions) seperti difusi, transformasi fase, dan reaksi pengendapan. Energi tinggi dari batas butir biasanya mengakibatkan konsentrasi atom yang larut lebih tinggi di perbatasan daripada di dalam butir. Ini menyulitkan pemisahan dampak mekanis murni batas butir terhadap sifat, dari dampak yang diakibatkan oleh segregasi ketidakmurnian.

Bilamana kristal tunggal mengalami deformasi tarik kristal tersebut biasanya bebas untuk berubah bentuk pada sistem luncur tunggal untuk bagian besar deformasi dan kristal dapat merubah orientasinya lewat rotasi kisi ketika

terjadi perpanjangan. Tetapi, butir individual dalam benda-uji polikristalin tidak harus mengalami sistem tegangan uniaksial tunggal, bilamana benda-uji mengalami deformasi tarik. Dalam polikristal, kontinuitas harus dipertahankan, sehingga batas antara kristal yang mengalami deformasi tetap tak berubah. Sekalipun tiap butir mencoba untuk berubah bentuk dengan homogen sesuai dengan deformasi benda-uji secara keseluruhan, keterbatasan yang dipaksakan oleh kontinuitas menyebabkan perbedaan yang menyolok dalam deformasi antara butir-butir berdekatan dan di dalam tiap butir. Kuliah tentang deformasi dalam aluminium berbutir kasar memperlihatkan bahwa regangan di sekitar batas butir biasanya berbeda antara butir dengan menyolok dari regangan di tengah-tengah butir. Sekalipun regangan bersifat kontinu sepanjang perbatasan, mungkin terdapat gradien regangan yang tajam di daerah ini.

Jika besar butir berkurang dan regangan meningkat, deformasi menjadi lebih homogen. Disebabkan oleh keterbatasan yang dipaksakan oleh batas butir, slip terjadi pada beberapa sistem, kendati regangan rendah. Hal ini menjadi penyebab terjadinya slip di bidang tak padat dalam daerah dekat batas butir. Bila garis tengah butir berkurang, lebih banyak dampak batas butir dirasakan di tengah butir. Jadi, pengerasan regangan logam berbutir halus akan besar daripada dalam agregat polikristalin berbutir kasar.

Pada temperatur di atas setengah titik lumer, deformasi dapat terjadi karena menggelincir sepanjang batas butir. Penggelinciran *batas butir* menjadi lebih menonjol kalau temperatur naik dan laju regangan berkurang, seperti dalam creep. Pemusatan deformasi pada daerah batas-butir merupakan salah satu sumber penting bagi patah-temperatur tinggi. Oleh karena kotoran cenderung memisah ke batas butir, patah antar-butir (intergranular fracture) sangat dipengaruhi oleh komposisi. Cara kasar untuk membedakan bila penggelinciran batas-butir memegang peran ialah dengan *temperatur sanw-lekat* (equicohesive temperature). Di atas temperatur ini daerah batas

butir lebih lemah daripada bagian dalam butir dan kekuatannya meningkat dengan bertambah besarnya butir. Di bawah temperatur sama-lekat, daerah batas butir lebih kuat dari bagian dalam butir dan kekuatan bertambah besar dengan berkurangnya ukuran butir (meningkatnya daerah perbatasan butir)..

Mekanisme penguatan yang dibahas dalam bab ini termasuk kelompok yang menghambat pergerakan konservatif dislokasi. Mekanisme ini berlangsung pada temperatur sekitar $0,5 T_m$, di mana T_m adalah temperatur lebur dalam derajat Kelvin.

10.2.Mekanisme Penguatan :

10.2.1.Penguatan Butir

Bukti langsung untuk penguatan mekanik batas butir diberikan oleh eksperimen pada bikristal di mana perbedaan orientasi antara batas butir membujur diubah-ubah secara sistematis. Tegangan luluh bikristal bertambah secara linear dengan meningkatnya salah orientasi sepanjang batas-butir dan ekstrapolasi hingga sudut-salah-orientasi-nol (zero misorientation angle) memberikan harga mendekati dengan harga tegangan luluh kristal tunggal. Hasil ini mengandung makna bahwa penguatan sebagai akibat batas butir merupakan hasil interferensi bersama terhadap slip di dalam butir.

Telah dilakukan beberapa usaha untuk mengkalkulasi kurva tegangan-regangan untuk polikristal berdasarkan kurva tegangan-regangan untuk kristal tunggal.

Hubungan Hall-Petch

Hall mengusulkan suatu hubungan umumn antara tegangan luluh (dan sifat mekanik lainnya) dengan besar butir. Hubungan ini kemudian dikembangkan oleh Petch.

$$\sigma_o = \sigma_i + kD^{-1/2}$$

di mana :

σ_o = tegangan luluh

σ_i = "tegangan gesekan" yang merupakan ketahanan kisi kristal terhadap pergerakan dislokasi

k = "parameter pengancing" yang menjadi ukuran kontribusi pengerasan relatif oleh batas butir

D = diameter butir

Persamaan Hall-Petch mula-mula disusun berdasarkan pengukuran titik luluh baja karbon rendah. Dan telah terbukti dapat menggambarkan hubungan antara besar butir dan tegang alir pada berbagai harga regang plastik hingga perpatahan rapuh. Selain itu dapat pula menggambarkan variasi tegangan perpatahan rapuh dengan besar butir dan ketergantungan kekuatan fatik pada besar butir. Persamaan Hal-Petch juga berlaku untuk jenis batas lainnya seperti batas ferit dan perlit dalam perlit, kembaran mekanik dan pelat martensit.

Pengukuran Ukuran-Butir

Ukuran-butir diukur dengan mikroskop cahaya dengan menghitung jumlah butir pada luas yang ditentukan, dengan menentukan jumlah butir (atau batas butir) yang berpotongan dengan panjang garis sembarang yang diketahui, atau dengan membandingkannya dengan kartu (chart) ukuran butir baku. Sebagian besar pengukuran ukuran-butir memerlukan pemisalan relatif terhadap bentuk dan distribusi ukuran butir dan karena

itu, harus ditafsirkan dengan hati-hati. Seperti yang ditunjukkan oleh De Hoff dan Rhines,' teknik yang paling mudah penerapannya ialah teknik yang menyediakan informasi struktur yang dapat memberikan korelasi dengan data sifat (property data) dan yang dapat dilaksanakan dengan pengukuran relatif sederhana pada permukaan yang dipoles.

Sebagian besar pengukuran ukuran-butir bertujuan untuk mencari hubungan antara batas-butir dengan sifat mekanis spesifik. Jadi, pengukuran batas butir tiap satuan volume S_v , ialah parameter yang berguna. Smith dan Guttman' memperlihatkan bahwa S_v dapat dihitung tanpa permasalahan yang berkaitan dengan bentuk butir dan distribusi ukuran dari pengukuran jumlah rata-rata intersep garis uji rambang dengan batas butir tiap panjang satuan garis uji NL .

$$S_v = 2NL$$

Kalau dari S_v diperlukan garis tengah butir rata-rata D , garis tengah ini dapat diperoleh dengan memisalkan bahwa butir berbentuk bulat dan berukuran konstan dan mencatat bahwa tiap perbatasan terbagi rata oleh dua butir yang berdekatan

Banyak kajian telah mempergunakan panjang intersep rata-rata garis uji rambang sebagai ukuran besarnya butir. Penentuan ini dibuat dengan membagi panjang total garis uji oleh jumlah butir yang dipotong-silang.

Metode yang lazim digunakan untuk mengukur ukuran-butir di Amerika Serikat ialah membandingkan butir pada perbesaran yang ditentukan dengan kartu ukuran butir American Society for Testing and Materials (ASTM). Hubungan antara bilangan ukuran butir ASTM n dan N^* , yaitu jumlah butir tiap inci kuadrat pada perbesaran 100 X dinyatakan oleh persamaan berikut: $N^* = 2^{n-1}$

10.1.2.Penguatan Regangan

Pengerasan regangan (strain hardening) adalah penguatan yang terjadi apabila logam dideformasi plastik. Apabila logam diregang sampai terjadi deformasi plastis, maka logam tersebut akan mengalami pengerasan regangan

10.1.3.Penguatan Larutan Padat

Penguatan larutan padat (solid solution streng hardening) adalah penguatan yang terjadi akibat penambahan unsur paduan, yang larut dalam bentuk larutan padat substitusi atau larutan padat intertisi.

10.1.4.Penguatan Fasa Kedua

Pengerasan fasa kedua (secong phase hardening) adalah penguatan yang terjadi melalui melarutkan dan mendistribusikan fasa kedua dalam matrik.

10.1.5.Penguatan Presipitasi

Pengerasan presipitasi (presipitation hardening) adalah penguatan yang terjadi akibat munculnya fasa baru berupa senyawa antar logam (intermetallic). Pembentukan fasa baru dipicu oleh penambahan unsur paduan pada logam yang membentuk larutan padat. Adapun jenis mekanisme penguatan lainnya termasuk Penguatan Dispersi, Penguatan Martensit, Penguatan Tekstur

