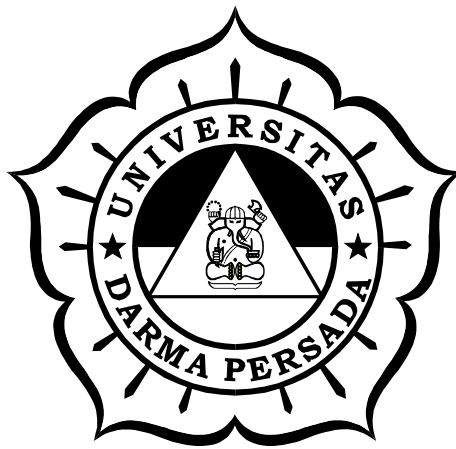


DIKTAT KULIAH
MATERIAL TEKNIK



TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DARMA PERSADA
2013

DIKTAT KULIAH

MATERIAL TEKNIK

Disusun :

ASYARI DARYUS

Jurusan Mesin Fakultas Teknik
Universitas Darma Persada
Jakarta.

KATA PENGANTAR

Dalam rangka memperlancar kegiatan pendidikan di Fakultas Teknik Universitas Darma Persada, maka diperlukan buku-buku pelajaran baik yang berbahasa Indonesia ataupun bahasa Inggris.

Diktat/buku ini disusun sebagai sumbangan satu lagi buku ajaran yang ditujukan untuk membantu mahasiswa jurusan teknik mesin, khususnya bagi yang mengikuti kuliah Material Teknik.

Isu buku ini meliputi pokok-pokok kuliah Material Teknik yang antara lain terdiri dari Struktur kristal, ketidaksempurnaan bahan padat, sifat mekanik logam, diagram fase, transformasi fase proses thermal, logam, besi, logam non-besi, keramik, komposit, kode dan standar.

Penulis sadari bahwa buku ini masih jauh dari sempurna, maka kritik dan saran yang bertujuan memperbaiki isi buku ini akan diterima dengan senang hati. Kepada semua pihak yang telah memberikan bantuannya sehingga buku ini dapat diterbitkan, penulis ucapkan banyak-banyak terima kasih.

Jakarta, Desember 2013

Ir. Asyari Daryus SE. MSc.

DAFTAR ISI

BAB I	: Pendahuluan.	1
BAB II	: Struktur Kristal Padatan.	4
BAB III	: Ketidakterpurnaan Bahan Padat.	24
BAB IV	: Sifat Mekanik Logam.	34
BAB V	: Diagram Fase.	49
BAB VI	: Transformasi Fase Pada Logam.	72
BAB VII	: Proses Thermal Logam Paduan.	89
BAB VIII	: Logam Besi.	98
BAB IX	: Logam Non-Ferous.	117
BAB X	: Keramik.	132
BAB XI	: Komposit.	147
BAB XII	: Kode dan Standar.	153

BAB I

PENDAHULUAN

PENDAHULUAN

Bahan / material merupakan kebutuhan bagi manusia mulai zaman dahulu sampai sekarang. Kehidupan manusia selalu berhubungan dengan kebutuhan bahan seperti pada transportasi, rumah, pakaian, komunikasi, rekreasi, produk makanan dll.

Perkembangan peradaban manusia juga bisa diukur dari kemampuannya memproduksi dan mengolah bahan untuk memenuhi kebutuhan hidupnya. (jaman batu, perunggu dsb).

Pada tahap awal manusia hanya mampu mengolah bahan apa adanya seperti yang tersedia di alam misalnya : batu, kayu, kulit, tanah dsb. Dengan perkembangan peradaban manusia bahan - bahan alam tsb bisa diolah sehingga bisa menghasilkan kualitas bahan yang lebih tinggi.

Pada 50 tahun terakhir para saintis menemukan hubungan sifat - sifat bahan dengan elemen struktur bahan. Sehingga bisa diciptakan puluhan ribu jenis bahan yang mempunyai sifat - sifat yang berbeda.

ILMU DAN REKAYASA MATERIAL

- Material science (Ilmu Material): disiplin ilmu yang mempelajari hubungan antara struktur material dengan sifat – sifat material.
- Material engineering (Rekayasa Material) : dengan dasar hubungan struktur dan sifat bahan, mendisain struktur bahan untuk mendapatkan sifat – sifat yang diinginkan.
- Struktur bahan : pengaturan / susunan elemen – elemen di dalam bahan.

Tinjauan struktur bahan dibedakan atas :

- Struktur subatomik : ditinjau dari susunan elektron dengan inti
 - Level atom : ditinjau dari pengaturan atom atau molekul satu sama lain
 - Mikroskopik : ditinjau dari kumpulan group – group atom
 - Makroskopik : ditinjau dari struktur yang bisa dilihat dengan mata telanjang.
- Sifat bahan : dilihat dari kemampuan bahan menerima perlakuan dari luar.

Sifat – sifat bahan padat bisa di kelompokkan atas 6 kategori :

- sifat mekanik
- sifat listrik
- sifat termal / panas
- sifat magnet
- sifat optik
- sifat deterioratif (penurunan kualitas).

Mengapa belajar tentang bahan ?

Beberapa alasan mengapa belajar tentang bahan :

- Banyak masalah bahan yang ditemui oleh insinyur di lapangan
Contoh : masalah transmisi roda gigi.
- Untuk bisa memilih bahan sesuai dengan spesifikasi aplikasi.

KLASIFIKASI BAHAN

Bahan bisa diklasifikasikan sbb :

- Logam : konduktor yang baik, tidak transparan.
- Keramik : campuran / senyawa logam + non logam.
- Polimer : adalah senyawa karbon dengan rantai molekul panjang, termasuk bahan plastik dan karet.
- Komposit : adalah campuran lebih dari satu bahan. (misal: keramik dengan polimer)
- Semi konduktor : adalah bahan-bahan yang mempunyai sifat setengah menghantar. → elektronik : IC, transistor
- Biomaterial : bahan yang digunakan pada komponen-komponen yang dimasukkan ketubuh manusia untuk menggantikan bagian tubuh yang sakit atau rusak.

Soal-soal:

1. Jelaskan perbedaan antara ilmu material dan rekayasa material.
2. Jelaskan pengertian dari struktur atom pada level subatomik, atom, mikroskopik dan makroskopik.
3. Sebutkan alasan-alasan mengapa mempelajari material teknik itu penting.
4. Jelaskan perbedaan antara bahan logam, keramik, polimer, komposit, semikonduktor dan biomaterial.
5. Apa maksudnya bahwa perkembangan peradaban manusia diukur dari kemampuannya memproduksi dan mengolah bahan.

BAB II

STRUKTUR KRISTAL PADATAN

STRUKTUR ATOM

Setiap atom terdiri dari inti yang sangat kecil yang terdiri dari proton dan neutron, dan di kelilingi oleh elektron yang bergerak. Elektron dan proton mempunyai muatan listrik yang besarnya $1,60 \times 10^{-19}$ C dengan tanda negatif untuk elektron dan positif untuk proton sedangkan neutron tidak bermuatan listrik. Massa partikel-partikel subatom ini sangat kecil: proton dan neutron mempunyai massa kira-kira sama yaitu $1,67 \times 10^{-27}$ kg, dan lebih besar dari elektron yang massanya $9,11 \times 10^{-31}$ kg.

Setiap unsur kimia dibedakan oleh jumlah proton di dalam inti, atau **nomor atom** (Z). Untuk atom yang bermuatan listrik netral atau atom yang lengkap, nomor atom adalah sama dengan jumlah elektron. Nomor atom merupakan bilangan bulat dan mempunyai jangkauan dari 1 untuk hidrogen hingga 94 untuk plutonium yang merupakan nomor atom yang paling tinggi untuk unsur yang terbentuk secara alami.

Massa atom (A) dari sebuah atom tertentu bisa dinyatakan sebagai jumlah massa proton dan neutron di dalam inti. Walaupun jumlah proton sama untuk semua atom pada sebuah unsur tertentu, namun jumlah neutron (N) bisa bervariasi. Karena itu atom dari sebuah unsur bisa mempunyai dua atau lebih massa atom yang disebut **isotop**. **Berat atom** berkaitan dengan berat rata-rata massa atom dari isotop yang terjadi secara alami. **Satuan massa atom (sma)** bisa digunakan untuk perhitungan berat atom. Suatu skala sudah ditentukan dimana 1 sma didefinisikan sebagai 1/12 massa atom dari isotop karbon yang paling umum, karbon 12 (^{12}C) ($A = 12,00000$). Dengan teori tersebut, massa proton dan neutron sedikit lebih besar dari satu, dan

$$A \cong Z + N$$

Berat atom dari unsur atau berat molekul dari senyawa bisa dijelaskan berdasarkan sma per atom (molekul) atau massa per mol material. Satu mol zat terdiri dari $6,023 \times 10^{23}$ atom atau molekul (bilangan Avogadro). Kedua teori berat atom ini dikaitkan dengan persamaan berikut:

$$1 \text{ sma/atom (molekul)} = 1 \text{ g/mol}$$

Sebagai contoh, berat atom besi adalah 55,85 sma/atom, atau 55,85 g/mol. Kadang-kadang penggunaan sma per atom atau molekul lebih disukai; pada kesempatan lain g/mol (atau kg/mol) juga digunakan; satuan yang terakhirlah yang akan digunakan pada buku ini.

IKATAN ATOM PADA BAHAN PADAT

Gaya Dan Energi Ikat

Ketika atom didekatkan dari suatu jarak yang tak terbatas. Pada jarak jauh, interaksi bisa diabaikan, tetapi ketika atom saling mendekati, masing-masing memberikan gaya ke yang lainnya. Gaya ini ada dua macam, tarik atau tolak, dan besarnya merupakan fungsi jarak antar atom. Sumber gaya tarik F_A tergantung pada jenis ikatan yang ada antara dua atom. Besarnya berubah dengan jarak, seperti yang digambarkan secara skematis pada Gambar 2.8a. Akhirnya, kulit elektron terluar dari kedua atom mulai tumpang tindih, dan gaya tolak yang kuat F_R mulai timbul. Gaya netto F_N antar dua atom adalah jumlah kedua komponen tarik dan tolak, yaitu :

$$F_N = F_A + F_R$$

yang juga merupakan fungsi jarak antar atom sebagaimana di plot pada Gambar 2.8a. Jika F_A dan F_R sama besar, tidak ada gaya netto, sehingga:

$$F_A + F_R = 0$$

Kemudian kondisi kesetimbangan muncul. Pusat kedua atom tetap terpisah pada jarak keseimbangan r_0 seperti ditunjukkan gambar 2.8a. Pada sebagian besar atom, r_0 kira-kira 0,3 nm (3\AA). Ketika sudah berada pada posisi ini, kedua atom akan melawan semua usaha untuk memisahkannya dengan gaya tarik, atau untuk mendorongnya dengan gaya tolak.

Kadang-kadang lebih menyenangkan untuk menggunakan energi potensial antara dua atom daripada gaya. Secara matematik, energi (E) dan gaya (F) dihubungkan dengan:

$$E = \int F dr$$

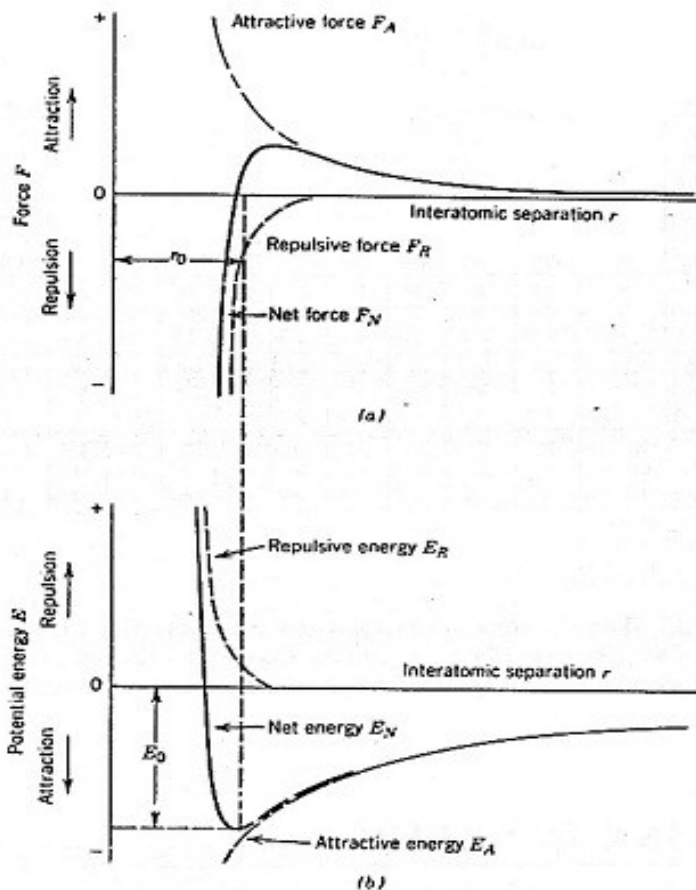


FIGURE 2.8 (a) The dependence of repulsive, attractive, and net forces as a function of interatomic separation for two isolated atoms. (b) The dependence of repulsive, attractive, and net potential energies as a function of interatomic separation for two isolated atoms.

Atau untuk sistem atom,

$$\begin{aligned}
 E_N &= \int_0^{\infty} F_N \, dr \\
 &= \int_0^{\infty} F_A \, dr + \int_0^{\infty} F_R \, dr \\
 &= E_A + E_R
 \end{aligned}$$

dimana E_N , E_A dan E_R masing-masing adalah energi netto, energi tarik dan energi tolak bagi dua atom yang terisolasi dan berdekatan.

Gambar 2.8b menggambarkan energi potensial tarik, tolak dan energi potensial netto sebagai fungsi jarak antar atom untuk dua atom. Untuk kurva netto, yaitu jumlah kedua energi, mempunyai energi potensial dititik minimum. Pada posisi ini spasi kesetimbangan yang sama, r_0 , bersesuaian dengan jarak atom pada kurva energi potensial minimum. **Energi Ikat** untuk kedua atom ini, E_0 , bersesuaian dengan energi pada titik minimum ini (juga diperlihatkan pada gambar 2.8b), dimana menyatakan energi yang diperlukan untuk memisahkan kedua atom ini kejarak yang tak terbatas.

Besar energi ikat ini dan bentuk energi vs kurva jarak antar atom berbeda dari satu material ke material lainnya, kedua variabel ini bergantung kepada jenis ikatan

atom. Zat padat dibentuk dengan energi ikat yang besar, sedangkan energi ikat yang kecil lebih disukai oleh gas, kondisi cair berlaku bagi energi yang besarnya menengah. Pada umumnya untuk material padat, temperatur leleh dan sifat ikatannya mencerminkan besarnya energi ikat.

IKATAN PRIMER

a. Ikatan Ion

Biasanya ditemukan pada senyawa yang dibangun oleh unsur logam dan bukan logam. Atom logam akan memberikan elektron valensinya ke atom-atom non logam. Pada proses ini semua atom akan menjadi stabil atau mempunyai konfigurasi gas mulia dan bermuatan listrik, yaitu atom-atom ini menjadi ion. Natrium klorida (NaCl) adalah material ion klasik. Atom natrium bisa mendapatkan struktur elektron neon (dan muatan positif tunggal) dengan menyerahkan satu elektron valensi 3s ke atom klorin. Setelah penyerahan elektron ini, ion klorin akan bermuatan negatif dan dengan konfigurasi elektron menyerupai argon. Pada natrium klorida, semua natrium dan klorin berada dalam bentuk ion. Jenis ikatan ini digambarkan secara skematik pada Gambar 2.9.

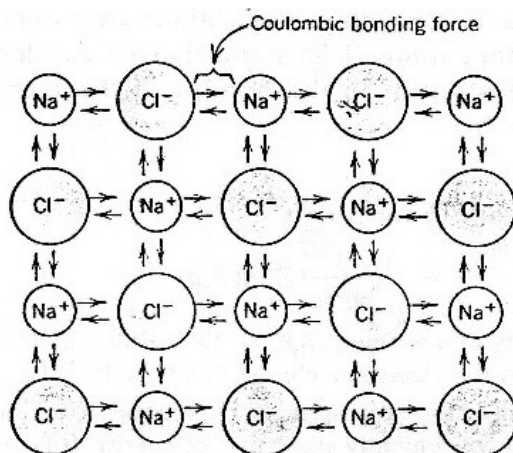


FIGURE 2.9 Schematic representation of ionic bonding in sodium chloride (NaCl).

Gaya ikat tarik menarik adalah coulombik; yaitu ion positif dan negatif tarik menarik satu sama lain karena adanya muatan listrik netto. Untuk dua ion yang terisolasi, energi tarik E_A adalah fungsi jarak atom sesuai dengan:

$$E_A = -\frac{A}{r}$$

dan dengan analogi yang sama, energi tolak adalah :

$$E_R = \frac{B}{r^n}$$

Pada perumusan diatas, A , B dan n adalah konstanta yang harganya tergantung pada masing-masing sistem ion. Harga n kira-kira 8.

Material ion mempunyai karakteristik keras dan rapuh, secara listrik dan termal adalah isolator.

b. Ikatan Kovalen

Pada ikatan kovalen, konfigurasi elektron stabil diperoleh dengan membagi elektron antara atom yang berdekatan. Dua atom yang berikatan kovalen masing-masing akan menyumbangkan minimal satu elektron keikatan, dan elektron yang dipakai bersama bisa di anggap dipunyai bersama oleh kedua atom. Ikatan kovalen digambarkan secara skematik pada Gambar 2.10 untuk molekul metana (CH_4). Atom karbon mempunyai empat elektron valensi, sedangkan setiap atom hidrogen mempunyai sebuah elektron valensi. Setiap atom hidrogen bisa mendapatkan konfigurasi elektron helium (dua elektron valensi $1s$) ketika atom karbon membaginya dengan satu elektron. Karbon sekarang mempunyai empat tambahan elektron, satu dari setiap hidrogen sehingga total elektron valensi menjadi delapan, dan struktur elektronnya adalah neon.

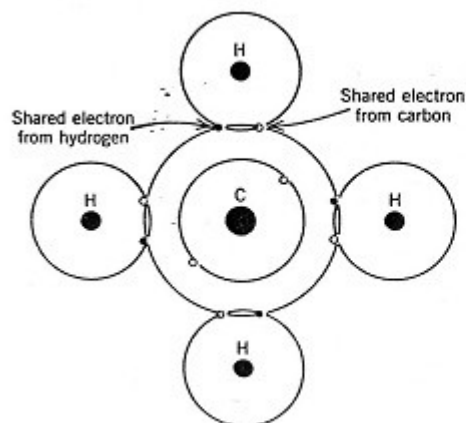


FIGURE 2.10 Schematic representation of covalent bonding in a molecule of methane (CH_4).

Jumlah ikatan kovalen yang mungkin untuk suatu atom ditentukan oleh jumlah elektron valensi. Untuk elektron valensi N' , sebuah atom bisa berikatan kovalen paling banyak $8 - N'$ dengan atom lainnya. Contohnya: $N' = 7$ pada klorin, dan $8 - N' = 1$, artinya satu atom Cl bisa berikatan hanya dengan satu atom lainnya seperti Cl_2 . Dengan cara yang sama untuk atom karbon $N' = 4$, dan setiap atom karbon mempunyai $8 - 4$ yaitu empat elektron untuk dibagi. Intan adalah struktur yang berinteraksi secara tiga dimensi

dimana setiap atom karbon berikatan kovalen dengan atom karbon lainnya. Susunan intan ini diperlihatkan pada Gambar 13.15.

Ikatan kovalen bisa sangat kuat seperti pada intan, dimana intan sangat sangat keras dan mempunyai temperatur leleh yang sangat tinggi yaitu $>3550^{\circ}\text{C}$ (6400°F), atau ikatan kovalen bisa sangat lemah seperti pada bismut, dimana akan meleleh pada 270°C (518°F). Material polimer bercirikan ikatan ini, dimana struktur molekul dasar yang dipunyai rantai karbon yang panjang diikat bersama-sama secara kovalen dengan dua dari empat ikatan yang tersedia untuk setiap atomnya.

Adalah mungkin ikatan antar atom mempunyai ikatan yang sebagian berikatan ion dan sebagian lain berikatan kovalen, dan kenyatannya sangat sedikit senyawa yang menunjukkan murni mempunyai ikatan ion atau ikatan kovalen saja.

c. Ikatan Logam

Ikatan logam, jenis ikatan primer terakhir, ditemukan pada logam dan paduannya. Material logam mempunyai satu, dua atau paling banyak tiga elektron valensi. Dengan model ini, elektron valensi tidak terikat kepada atom tertentu pada bahan padat namun lebih kurang ia akan bebas hanyut/bergerak melewati keseluruhan logam. Elektron ini bisa dianggap dimiliki oleh logam secara keseluruhan, atau membentuk "lautan elektron" atau "awan elektron. Gambar 2.11 memperlihatkan ilustrasi skematik ikatan logam.

Ikatan ini bisa lemah atau kuat, jangkauan energinya antara 68 kJ/mol ($0,7\text{ ev/atom}$) untuk raksa hingga 850 kJ/mol ($8,8\text{ ev/atom}$) untuk wolfram. Temperatur leleh masing-masing berturut-turut adalah -39 dan 3410°C (-38 dan 6170°F).

IKATAN SEKUNDER ATAU IKATAN VAN DER WAALS

Ikatan sekunder, van der Waals atau fisik adalah lemah jika dibandingkan dengan ikatan primer atau kimia; energi ikat biasanya dalam kisaran 10 kJ/mol ($0,1\text{ ev/atom}$). Ikatan sekunder timbul antara semua atom atau molekul, tapi keberadaannya tidak jelas jika salah satu dari ketiga jenis ikatan primer ada. Ikatan sekunder dibuktikan oleh gas mulia, yang mempunyai struktur elektron yang stabil, dan juga diantara molekul yang strukturnya berikatan kovalen.

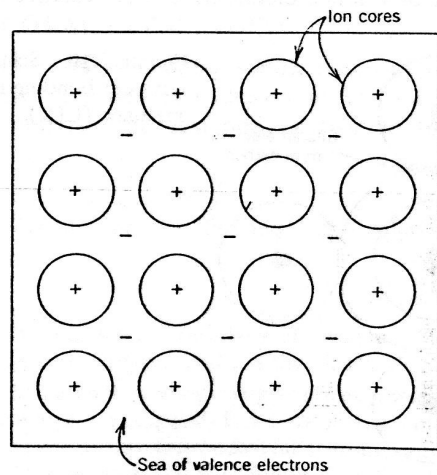


FIGURE 2.11 Schematic illustration of metallic bonding.

Gaya ikatan sekunder timbul dari dipol atom atau molekul. Pada dasarnya sebuah dipol listrik timbul jika ada jarak pisah antara bagian positif dan negatif dari sebuah atom atau molekul. Ikatan di hasilkan dari gaya tarik-menarik coulombik antara ujung positif sebuah dipol dan bagian negatif dari dipol yang berdekatan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.12. Interaksi dipol terjadi antara dipol-dipol terimbas, antara dipol terimbas dengan molekul polar (yang mempunyai dipol permanen), dan antara molekul-molekul polar. Ikatan hidrogen, jenis khusus dari ikatan sekunder, ditemukan pada beberapa molekul dimana hidrogen sebagai salah satu komponen. Mekanisme ikatan ini akan dibicarakan secara singkat berikut ini.

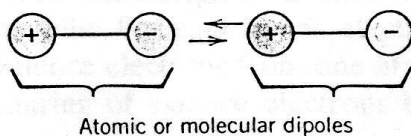


FIGURE 2.12 Schematic illustration of van der Waals bonding between two dipoles.

a. Ikatan Dipol Terimbas yang Berfluktuasi

Sebuah dipol bisa dihasilkan atau diimbaskan ke sebuah atom atau molekul yang simetris secara listrik, yaitu distribusi ruang keseluruhan elektron simetris terhadap inti bermuatan positif, sebagaimana diperlihatkan Gambar 2.13a. Semua atom mengalami gerak vibrasi konstan, yang akan menyebabkan distorsi seketika dan berumur pendek, terhadap simetri listrik pada beberapa atom atau molekul, dan menimbulkan dipol listrik kecil, seperti yang digambarkan oleh Gambar 2.13b.

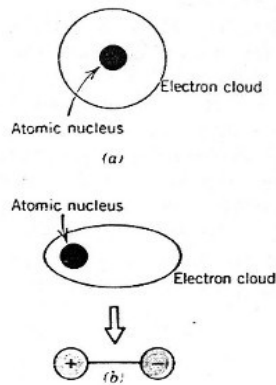


FIGURE 2.13 Schematic representations of (a) an electrically symmetric atom and (b) an induced atomic dipole.

Salah satu dipol ini pada gilirannya bisa menimbulkan sebuah pergerakan pada distribusi elektron dari molekul atau atom yang berdekatan, yang membuat atom atau molekul kedua ini menjadi dipol yang kemudian dengan lemah ditarik atau diikat ke atom atau molekul yang pertama; ini adalah satu jenis ikatan van der Waals. Gaya-gaya tarik ini bisa timbul diantara sejumlah besar atom atau molekul, dimana gaya-gaya ini bersifat sementara dan berfluktuasi terhadap waktu.

Proses pencairan dan, dalam beberapa hal, proses pembekuan dari gas mulia dan molekul lain yang simetris dan netral secara listrik seperti H_2 dan Cl_2 dipercaya disebabkan oleh ikatan jenis ini. Temperatur leleh dan didih adalah sangat rendah pada material dimana ikatan dipol terimbas dominan, dan dari semua ikatan antar molekul yang mungkin terjadi, ikatan ini paling lemah.

b. Ikatan Antara Dipol Molekul Polar dan Dipol Terimbas

Momen dipol permanen timbul pada beberapa molekul karena susunan yang tidak simetris dari daerah yang bermuatan positif dan negatif; molekul ini disebut **molekul polar**. Gambar 2.14 adalah penggambaran skematik dari molekul hidrogen klorida; momen dipol permanen timbul dari muatan netto dari muatan positif dan negatif yang masing-masing berkaitan dengan ujung-ujung hidrogen dan klorin dari molekul HCl.

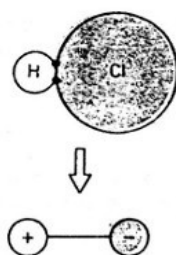


FIGURE 2.14 Schematic representation of a polar hydrogen chloride (HCl) molecule.

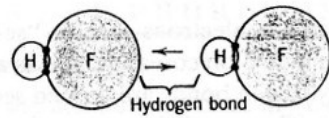


FIGURE 2.15 Schematic representation of hydrogen bonding in hydrogen fluoride (HF).

Molekul polar bisa juga mengimbaskan dipol pada molekul non polar didekatnya, dan sebuah ikatan akan terbentuk sebagai hasil gaya tarik menarik antara dua molekul ini. Lebih jauh, besar ikatan ini akan lebih besar dari pada dipol terimbas yang berfluktuasi.

c. Ikatan Dipol Permanen

Gaya van der Waals juga akan timbul diantara molekul polar yang berdekatan. Energi ikat yang terkait lebih besar secara signifikan dari pada energi ikat yang ada pada dipol terimbas.

Jenis ikatan sekunder yang paling kuat, ikatan hidrogen, adalah kasus khusus dari ikatan molekul polar. Ikatan ini terjadi antara molekul dimana hidrogen berikatan kovalen dengan fluorin (sebagai HF), dengan oksigen (sebagai H₂O), dan dengan nitrogen (sebagai NH₃).

Untuk setiap ikatan H-F, H-O atau H-N, elektron hidrogen tunggal dibagi bersama dengan atom lainnya. Maka, ujung hidrogen dari ikatan pada dasarnya adalah proton terbuka yang bermuatan positif, yang tak terlindungi oleh elektron. Ujung molekul yang bermuatan positif sangat tinggi ini mempunyai gaya tarik yang kuat terhadap ujung negatif dari molekul yang berdekatan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.15 untuk HF. Besar ikatan hidrogen umumnya lebih besar dari ikatan sekunder jenis lainnya, dan bisa mencapai 51 kJ/mol (0,52 eV/molekul).

MOLEKUL

Molekul bisa didefinisikan sebagai sebuah kelompok atom yang terikat bersama-sama oleh ikatan primer yang kuat. Dalam konteks ini, keseluruhan spesimen padat yang terikat dengan ikatan logam dan ion bisa dianggap sebagai molekul tunggal. Pada cairan terkondensasi dan bahan padat, ikatan antar molekulnya adalah ikatan sekunder lemah. Konsekuensinya, material molekul mempunyai temperatur leleh dan didih yang rendah. Sebagian besar dari mereka yang mempunyai molekul kecil yang dibentuk oleh beberapa atom adalah gas pada temperatur dan tekanan biasa atau ambien. Disisi lain, banyak polimer modern, merupakan material molekul yang dibangun oleh molekul yang sangat besar, berada pada kondisi padat; beberapa dari sifat-sifat mereka sangat bergantung kuat atas keberadaan ikatan sekunder van der Waals dan hidrogen.

KRISTAL

Material **kristal** adalah material padat dimana atom-atomnya tersusun dalam susunan yang berulang dan periodik pada dimensi yang besar yaitu atom-atom berada pada kondisi "keteraturan jarak panjang". Untuk material non-kristal atau *amorfus*, keteraturan atom jarak panjang tidak muncul.

SEL SATUAN

Ketika menerangkan struktur kristal, atom (atau ion) dilukiskan sebagai bola padat dan model ini disebut dengan *model bola keras atom* dimana setiap bola akan menyinggung bola terdekat.

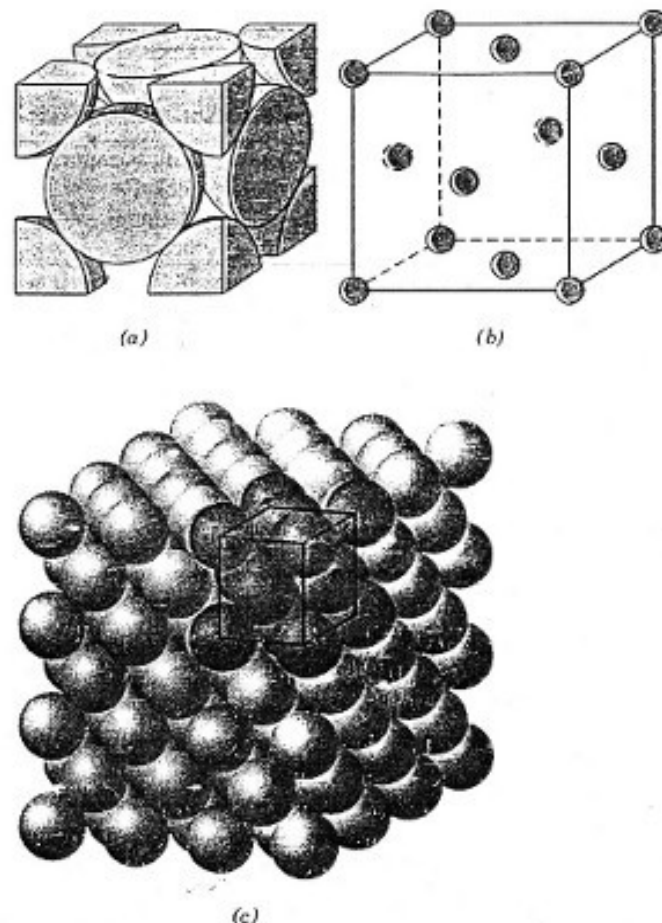


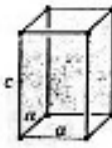
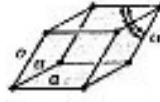
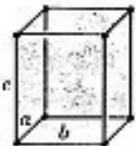
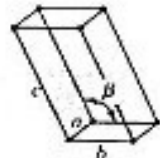



FIGURE 3.1 For the face-centered cubic crystal structure: (a) a hard sphere unit cell representation, (b) a reduced-sphere unit cell, and (c) an aggregate of many atoms. (Figure c adapted from W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulfi, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, Structure, p. 51. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Susunan atom pada kristal padat memperlihatkan bahwa sekelompok kecil atom membentuk pola yang berulang. Karena itu dalam menerangkan struktur kristal, lebih mudah untuk membagi struktur ke dalam kesatuan kecil yang berulang yang disebut **sel satuan**. Sel satuan pada sebagian besar struktur kristal berbentuk jajaran genjang

atau prisma yang mempunyai tiga set permukaan yang sejajar (gambar 3.1c), dimana dalam hal ini sebuah kubus.

Table 3.2 Lattice Parameter Relationships and Figures Showing Unit Cell Geometries for the Seven Crystal Systems

<i>Crystal System</i>	<i>Axial Relationships</i>	<i>Interaxial Angles</i>	<i>Unit Cell Geometry</i>
Cubic	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Rhombohedral	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Monoclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Triclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

Sel satuan bisa kadang-kadang digambarkan dengan model *sel satuan bola diperkecil* seperti terlihat pada gambar 3.1b.

SISTEM KRISTAL

Jika dilihat dari geometri sel satuan, ditemukan bahwa kristal mempunyai tujuh kombinasi geometri yang berbeda seperti diperlihatkan pada tabel 3.2.

Pada sebagian besar logam, struktur kristal yang dijumpai adalah: kubus pusat sisi, FCC (*face-centered cubic*), kubus pusat ruang, BCC (*body-centered cubic*) dan tumpukan padat heksagonal, HCP (*hexagonal close-packed*).

Beberapa logam, dan juga non-logam, bisa mempunyai lebih dari satu struktur kristal, fenomena ini disebut polimorfisme. Jika kondisi ini dijumpai pada bahan padat elemental maka disebut alotropi.

KUBUS PUSAT SISI, FCC

Struktur kristal ini termasuk kristal kubus dimana terdapat atom disetiap sudut kubus ditambah masing-masing satu buah atom di setiap permukaan/sisi kubus. Sifat ini banyak dijumpai pada logam seperti tembaga, aluminium, perak dan emas. Gambar 3.1 memperlihatkan kristal jenis ini. Panjang sisi kubus a dan jari-jari atom R dihubungkan dengan persamaan:

$$a = 2R\sqrt{2}$$

Fraksi volume bola padat di dalam sel satuan atau disebut **faktor penumpukan atom, FP** dirumuskan:

$$FP = \frac{\text{volume atom didalam sel satuan}}{\text{volume total sel satuan}}$$

Untuk struktur FCC, Faktor Penumpukan Atom adalah 0,74. Logam umumnya mempunyai faktor penumpukan atom yang relatif besar untuk memaksimalkan efek pembungkusan oleh elektron bebas.

KUBUS PUSAT RUANG, BCC

Struktur kristal ini mempunyai atom di setiap sudut kubus ditambah sebuah atom didalam kubus, seperti yang ditunjukkan gambar 3.2.

Panjang sel satuan dirumuskan dengan:

$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$$

Faktor Penumpukan Atom kristal ini adalah 0,68.

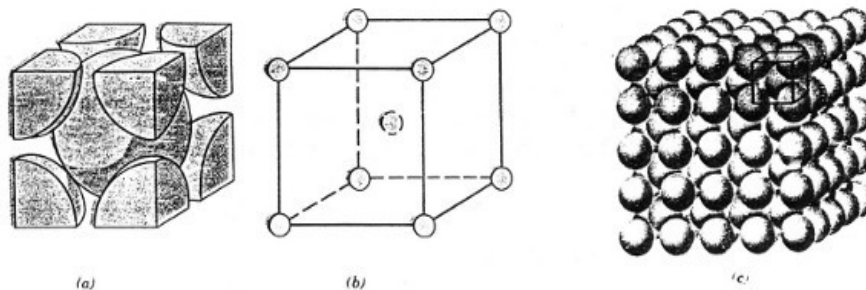


FIGURE 3.2 For the body-centered cubic crystal structure, (a) a hard sphere unit cell representation, (b) a reduced-sphere unit cell, and (c) an aggregate of many atoms. (Figure (c) from W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. 1, *Structure*, p. 51. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

TUMPUKAN PADAT HEKSAGONAL, HCP

Gambar 3.3 memperlihatkan sel satuan jenis ini. Sel satuan jenis ini adalah jenis sel satuan heksagonal. Permukaan atas dan bawah sel satuan terdiri dari enam atom yang membentuk heksagonal yang teratur dan mengelilingi sebuah atom ditengah-tengahnya. Bidang lain yang mempunyai tiga atom tambahan pada sel satuan terletak antara bidang atas dengan bidang bawah. Enam atom ekuivalen dipunyai oleh setiap sel satuan ini.

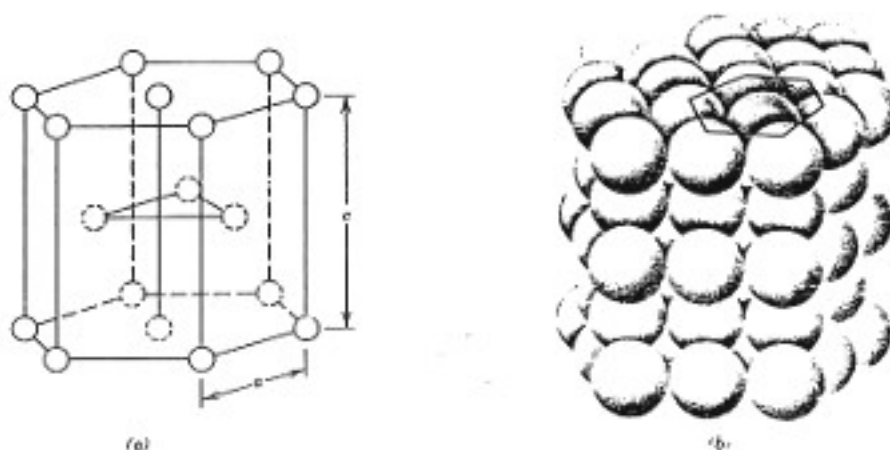


FIGURE 3.3 For the hexagonal close-packed crystal structure, (a) a reduced-sphere unit cell (a and c represent the short and long edge lengths, respectively), and (b) an aggregate of many atoms. (Figure (b) from W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. 1, *Structure*, p. 51. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Faktor penumpukan atom untuk sel satuan HCP adalah sama dengan sel satuan FCC. Logam yang mempunyai struktur kristal ini antara lain: cadmium, magnesium, titanium dan seng.

KERAPATAN ATOM

Kerapatan atom struktur kristal bisa dicari dengan persamaan:

$$\rho = \frac{nA}{V_C N_A}$$

dimana : n = jumlah atom yang terkait dengan sel satuan

A = berat atom

V_C = volume sel satuan

N_A = bilangan avogadro ($6,023 \times 10^{23}$ atom/mol)

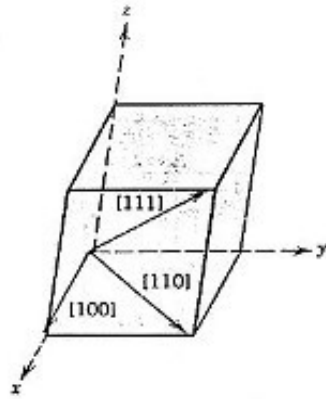
ARAH KRISTALOGRAFI

Ketika berurusan dengan material kristal, sering diperlukan untuk menentukan beberapa bidang kristalografi atau arah kristalografi. Arah kristalografi didefinisikan sebagai sebuah garis antara dua titik, atau sebuah vektor. Langkah-langkah dalam menentukan indeks arah:

1. Sebuah vektor dengan panjang tertentu diletakkan sedemikian sehingga vektor tersebut melewati titik asal sistem koordinat. Vektor bisa ditranlasikan di sepanjang kisi kristal tanpa perubahan, jika keparalelannya dijaga.
2. Tentukan panjang proyeksi vektor pada masing-masing sumbu; Proyeksi diukur dalam dimensi sel satuan yaitu a , b , dan c .
3. Ketiga angka ini dikali atau dibagi dengan suatu faktor untuk mendapatkan bilangan bulat terkecil.
4. Tiga indeks yang didapat, ditulis tanpa memakai koma dan diberi tanda kurung persegi, $[u\ v\ w]$. u , v , dan w adalah harga proyeksi pada sumbu x , y dan z .

Catatan: Jika indeks negatif, tanda negatif ditulis dengan strip diatas indeks.

FIGURE 3.5 The [100], [110], and [111] directions within a unit cell.

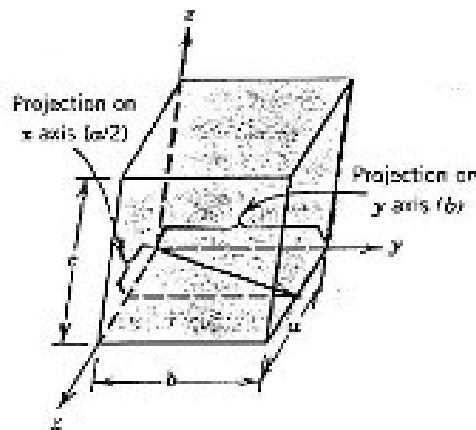


Contoh:

Carilah indeks arah gambar dibawah ini.

Jawab:

Vektor melewati titik awal sistem koordinat, karena itu tidak dibutuhkan translasi. Proyeksi vektor pada sumbu x, y dan z masing-masing adalah $a/2$, b dan $0c$, yang menjadi $\frac{1}{2}$, 1 dan 0 dalam satuan parameter sel satuan (a, b, c). Untuk mendapatkan bilangan bulat terkecil, angka-angka dikalikan dengan 2 sehingga didapatkan 1, 2, 0 yang kemudian diberi tanda kurung menjadi [1 2 0]. Prosedur ini bisa ditunjukkan sebagai berikut:



	x	y	z
proyeksi	$a/2$	b	$0c$
proyeksi (dalam satuan a,b,c)	$\frac{1}{2}$	1	0
pembulatan	1	2	0
diberi kurung	[1 2 0]		

BIDANG KRISTALOGRAFI

Bidang kristalografi dituliskan dengan indeks Miller dalam format (h k l). Bidang-bidang yang paralel satu sama lain adalah ekuivalen dan mempunyai indeks yang identik.

Prosedur dalam menentukan indeks Miller adalah sebagai berikut:

1. Jika bidang melalu titik awal, buat bidang paralel lainnga di dalam sel satuan dengan translasi. Atau dengan membuat titik awal lain di sudut lain sel satuan.
2. Bidang yang dicari bisa berpotongan atau sejajar dengan sumbu. Panjang bidang yang berpotongan ditulis dalam satuan parameter kisi a, b dan c.
3. Ambil kebalikan dari angka-angka perpotongan tersebut. Bidang yang sejajar dengan sumbu dianggap berpotongan di tak berhingga sehingganya kebalikannya adalah nol.
4. Bila perlu robah ketiga bilangan ini ke bilangan bulat terkecil dengan mengali atau membaginya dengan suatu faktor tertentu.
5. Tulis indeks ini tanpa koma dengan diapit tanda kurung biasa, (h k l).

Catatan: Jika indeks negatif, tanda negatif ditulis dengan strip diatas indeks.

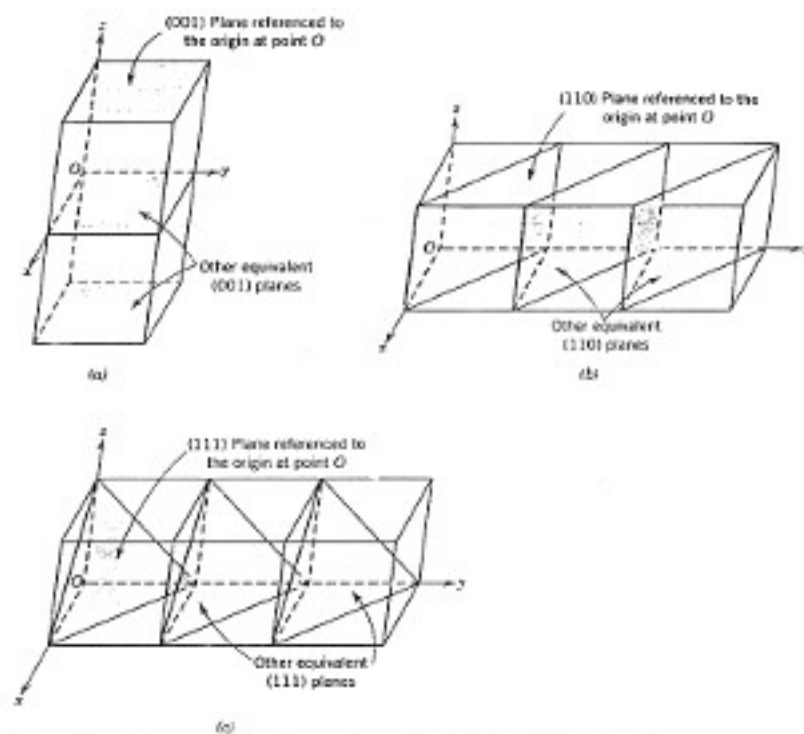
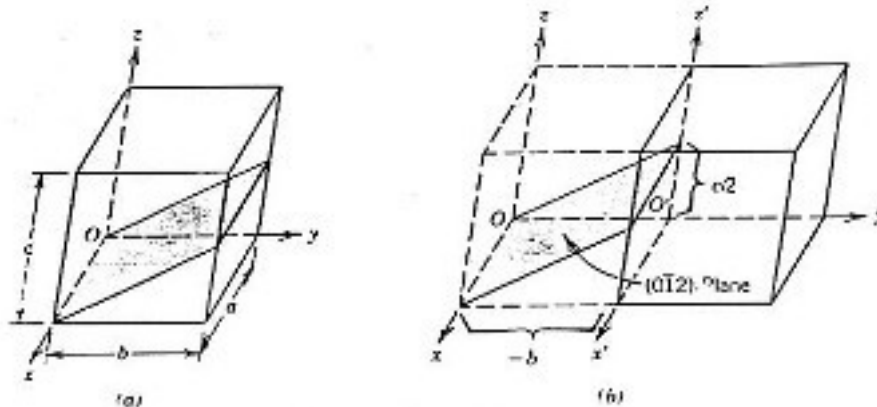


FIGURE 3.8 Representations of a series each of (a) (001), (b) (110), and (c) (111) crystallographic planes.

Contoh:

Tentukan indeks Miller dari bidang yang ditunjukkan gambar dibawah ini.



Jawab:

Karena bidang melalui titik awal O, titik awal yang baru mesti dibuat, ditulis sebagai O', diperlihatkan pada gambar b. Bidang ini paralel dengan sumbu x, sehingga perpotongannya di $\sim a$. Perpotongan dengan sumbu y dan z dengan referensi titik awal O' adalah $-b$ dan $c/2$. Dalam satuan parameter kisi a, b, c maka perpotongan bidang adalah \sim , -1 dan $1/2$, dan karena angkanya sudah bulat tidak perlu lagi langkah pembulatan. Terakhir ditulis dengan tanda kurung menjadi $(0 \bar{1} 2)$.

Langkah-langkah ini secara ringkas disimpulkan sebagai berikut:

	x	y	z
perpotongan	$\sim a$	$-b$	$c/2$
perpotongan (dalam satuan a,b,c)	\sim	-1	$1/2$
pembalikan	0	-1	2
pembulatan (tidak diperlukan)			
tutup kurung	$(0 \bar{1} 2)$		

KRISTAL TUNGGAL

Untuk bahan padat kristal, susunan atom yang periodik dan berulang adalah sempurna atau berlanjut di keseluruhan spesimen tanpa gangguan, hasilnya disebut kristal tunggal. Semua sel satuan bersambung dengan cara yang sama dan mempunyai orientasi yang sama.

POLIKRISTAL

Sebagian besar bahan padat kristal disusun oleh sekumpulan kristal-kristal kecil atau butir. Kristal seperti ini disebut **polikristal**. Berbagai tingkat dalam pembekuan spesimen polikristal diperlihatkan secara skematik oleh gambar 3.16. Pertama-tama kristal kecil atau nuklei terbentuk di berbagai posisi. Kristal ini mempunyai orientasi kristalografi acak, sebagaimana ditunjukkan oleh jaring persegi. Butir-butir kecil tumbuh. Ujung-ujung atom yang berdekatan bersinggungan satu sama lain ketika proses pembekuan mendekati selesai. Hasilnya orientasi kristalografi akan berbeda antara satu butir dengan butir lainnya.

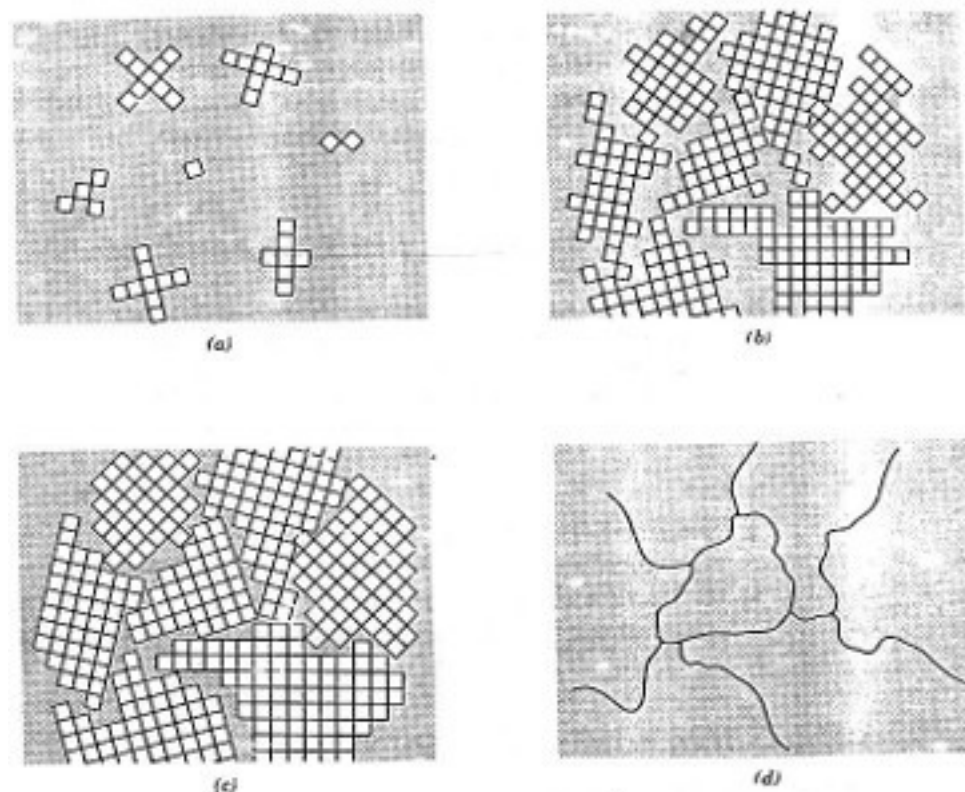


FIGURE 3.16 Schematic diagrams of the various stages in the solidification of a polycrystalline material; the square grids depict unit cells. (a) Small crystallite nuclei. (b) Growth of the crystallites; the obstruction of some grains that are adjacent to one another is also shown. (c) Upon completion of solidification, grains having irregular shapes have formed. (d) The grain structure as it would appear under the microscope; dark lines are the grain boundaries. (Adapted from W. Rosenhain, *An Introduction to the Study of Physical Metallurgy*, 2nd edition, Constable & Company Ltd., London, 1915.)

Soal-soal

1. a. Apa yang dimaksud dengan isotop?
b. Kenapa berat atom unsur bukan merupakan bilangan bulat? Sebutkan dua alasan.
2. Sebutkan perbedaan antara massa atom dan berat atom.
3. a. Berapa jumlah gram dalam 1 amu material?
b. Mol, dalam konteks diktat ini, diambil dalam satuan gram-mole. Berdasarkan hal tersebut, berapa banyak atom yang dijumpai dalam 1 pound-mole dari suatu zat?
4. Sebutkan secara ringkas perbedaan antara ikatan ion, kovalen dan logam.
5. Apa jenis ikatan dari material-material berikut: Calcium Fluoride (CaF_2), perunggu, cadmium Tellurida (CdTe), karet, dan tungsten.
6. Jelaskan kenapa hidrogen fluorida (HF) mempunyai temperatur leleh yang lebih tinggi dari Hidrogen Clorida (HCl) ($19,4$ vs -85°C), walaupun HF mempunyai berat molekul yang lebih rendah.

BAB III

KETIDAKSEMPURNAAN BAHAN PADAT

Susunan yang sempurna ada di keseluruhan material kristal pada skala atom tidaklah ada. Semua bahan padat mengandung sejumlah besar cacat atau ketidaksempurnaan.

CACAT TITIK

Vakansi dan Interstisi-Diri

Vakansi adalah kekosongan sisi kisi, yaitu sisi yang seharusnya ditempati atom, kehilangan atomnya (gambar 4.1). Vakansi terbentuk selama proses pembekuan, dan juga karena getaran atom yang mengakibatkan perpindahan atom dari sisi kisi normalnya.

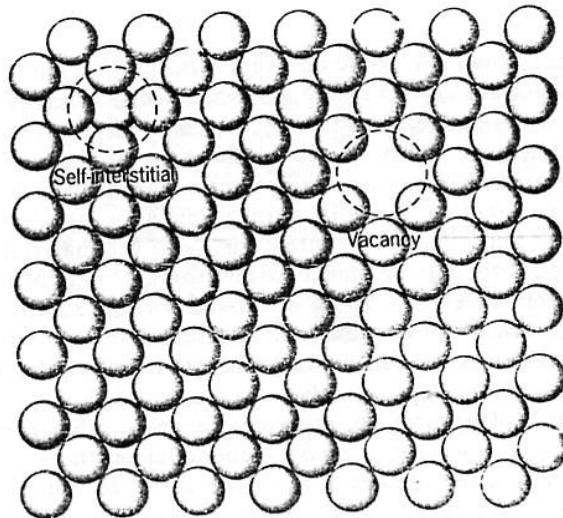


FIGURE 4.1 Two-dimensional representations of a vacancy and a self-interstitial. (Adapted from W. G. Moffatt, G. W. Pearsall and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 77. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Angka kesetimbangan vakansi, N_v untuk material tertentu tergantung atas kenaikan temperatur sesuai dengan persamaan:

$$N_v = N \exp\left(-\frac{Q_v}{kT}\right)$$

dimana N = jumlah total sisi

Q_v = energi yang diperlukan untuk membentuk vakansi

T = temperatur mutlak, K

k = konstanta Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/atom-K = $8,62 \times 10^{-5}$ eV/atom-K

Interstisi-Diri (self-interstitial) adalah sebuah atom dari bahan kristal yang berdesakan ke dalam sisi interstisi, yaitu ruang kosong kecil dimana dalam kondisi normal tidak diisi atom. Jenis cacat ini bisa dilihat pada gambar 4.1. Pada logam, interstisi diri mengakibatkan distorsi yang relatif besar di sekitar kisi karena atom interstisi lebih besar dari ruang interstisi. Karena itu pembentukan cacat ini kemungkinannya kecil, dan juga konsentrasinya kecil, dimana konsentrasinya jauh lebih kecil dari cacat vakansi.

Contoh Soal

Hitunglah angka kesetimbangan vakansi per meter kubik untuk tembaga pada suhu 1000 °C. Energi pembentukan vakansi adalah 0,9 eV/atom; berat atom dan kerapatannya (pada 1000 °C) masing-masing adalah 63,5 g/mol dan 8,4 g/cm³.

Jawab

Pertama-tama tentukan harga N , jumlah sisi atom per meter kubik untuk tembaga dari berat atomnya A_{cu} , kerapatannya ρ , dan bilangan Avogadro N_A , sesuai dengan:

$$\begin{aligned} N &= \frac{N_A \rho}{A_{cu}} \\ &= \frac{(6,023 \times 10^{23} \text{ atom/mol}) (8,4 \text{ g/cm}^3) (10^6 \text{ cm}^3/\text{m}^3)}{63,5 \text{ g/mol}} \\ &= 8,0 \times 10^{28} \text{ atom/m}^3 \end{aligned}$$

Jumlah vakansi pada 1000 °C (1273 K) adalah:

$$\begin{aligned} N_v &= N \exp\left(-\frac{Q_v}{kT}\right) \\ &= (8,0 \times 10^{28} \text{ atom/m}^3) \exp\left[-\frac{(0,9 \text{ eV})}{(8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K})(1273 \text{ K})}\right] \\ &= 2,2 \times 10^{25} \text{ vakansi/m}^3 \end{aligned}$$

Impuritas Pada Bahan Padat

Impuritas adalah atom asing yang hadir pada material. Logam murni yang hanya terdiri dari satu jenis atom adalah tidak mungkin. Impuritas bisa menyebabkan cacat titik pada kristal. Ada paduan dimana atom impuritas sengaja ditambahkan untuk mendapatkan karakteristik tertentu pada material seperti untuk meningkatkan kekuatan mekanik atau ketahanan korosi. Contohnya, perak sterling adalah paduan 92,5% perak - 7,5% tembaga dimana perak yang ditambahkan tembaga akan menaikkan kekuatan mekaniknya secara signifikan.

Penambahan atom impuritas ke logam akan mengakibatkan pembentukan **larutan padat** dan/atau fasa kedua yang baru, tergantung pada jenis impuritas, konsentrasi dan temperatur paduan.

Larutan Padat

Larutan padat terbentuk ketika atom *solute* ditambahkan ke material induk, struktur kristal tetap dijaga, dan tidak ada struktur baru yang terbentuk. Bisa dianalogikan dengan air yang dicampur dengan alkohol yang akan menghasilkan larutan cair ketika molekulnya bercampur dan komposisinya homogen.

Larutan padat juga mempunyai komposisi homogen dan atom impuritas tersebar secara acak dan seragam didalam padatan. Cacat titik impuritas dijumpai dalam dua jenis: *substitusi* dan *interstisi*. Ada beberapa ciri atom pelarut dan *solute* yang akan menentukan derajat kelarutan atom *solute* pada atom pelarut, yaitu:

1. Faktor ukuran atom.

Larutan padat terjadi jika perbedaan jari-jari atom kedua atom kurang dari 15%.

2. Struktur kristal.

Untuk kemampularutan padatan yang besar, struktur kristal kedua atom logam harus mempunyai jenis yang sama.

3. Elektronegativitas.

Makin elektropositif suatu unsur dan makin elektronegatif unsur yang lain, makin besar kecenderungan unsur-unsur ini akan membentuk senyawa logam daripada larutan padat substitusi.

4. Valensi.

Jika faktor-faktor lain sama, sebuah logam akan mempunyai kecenderungan melarutkan logam lainnya yang mempunyai valensi lebih tinggi dari pada logam yang valensinya rendah.

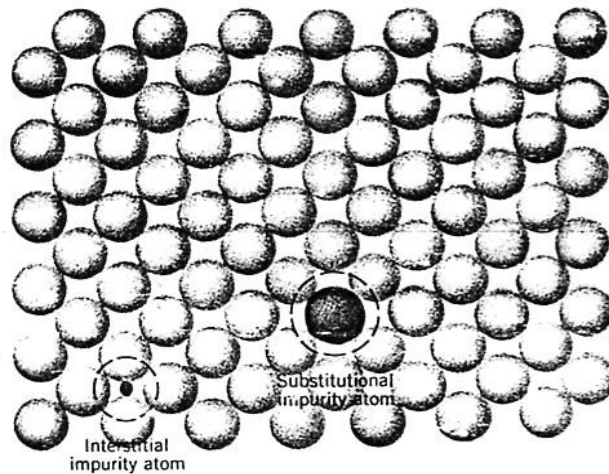


FIGURE 4.2 Two-dimensional schematic representations of substitutional and interstitial impurity atoms. (Adapted from W. G. Moffatt, G. W. Pearsall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 77. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

Spesifikasi Komposisi

Komposisi sebuah paduan bisa dinyatakan dalam bentuk unsur-unsur pokoknya. Ada dua cara untuk menyatakan ini yaitu persen berat (%wt) dan persen atom.

Konsentrasi atom 1 dalam persen berat didalam campuran atom 1 dengan atom 2 adalah:

$$C_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \times 100$$

dimana : m_1 = berat (massa) unsur 1

m_2 = berat (massa) unsur 2

konsentrasi atom kedua dicari dengan cara yang sama.

Konsentrasi atom 1 dalam persen atom didalam campuran atom 1 dengan atom 2 adalah:

$$C'_1 = \frac{n_{m1}}{n_{m1} + n_{m2}} \times 100$$

dimana : n_{m1} = jumlah mol unsur 1

n_{m2} = jumlah mol unsur 2

Jumlah mol unsur bisa dicari dengan membagi massa unsur dengan berat atomnya.

Persen konsentrasi atom ke dua bisa dicari dengan cara yang sama.

KETIDAK-SEMPURNAAN YANG LAIN

Dislokasi – Cacat Linier

Dislokasi adalah cacat linier atau satu dimensi dimana didekatnya beberapa atom tidak segaris. Ada 3 jenis dislokasi yaitu : dislokasi sisi, dislokasi ulir dan dislokasi campuran.

Dislokasi sisi/pinggir adalah terdapatnya bidang atom ekstra atau setengah bidang, dimana sisinya terputus di dalam kristal. Gambar 4.3 memperlihatkan skematik dari dislokasi sisi.

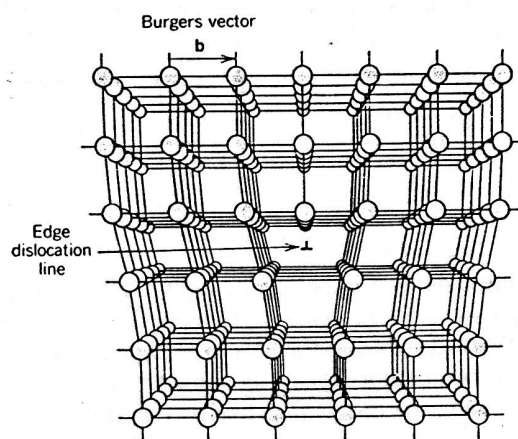


FIGURE 4.3 The atom positions around an edge dislocation; extra half-plane of atoms shown in perspective. (Adapted from A. G. Guy, *Essentials of Materials Science*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1976, p. 153.)

Dislokasi sisi disimbolkan dengan \perp .

Dislokasi ulir terbentuk karena gaya geser yang diberikan menghasilkan distorsi seperti yang ditunjukkan Gambar 4.4a. Daerah depan bagian atas kristal tergeser sebesar satu atom kekanan relatif terhadap bagian bawah. Dislokasi ini disimbolkan dengan .

Jika pada material dijumpai kedua jenis dislokasi diatas maka disebut material mempunyai *dislokasi campuran*. Contoh dislokasi campuran bisa dilihat pada gambar 4.5.

Dislokasi pada material timbul karena: proses pembekuan, karena deformasi plastis, karena tegangan termal sebagai hasil pendinginan cepat.

FIGURE 4.4 (a) A screw dislocation within a crystal. (b) The screw dislocation in (a) as viewed from above. The dislocation line extends along line AB . Atom positions above the slip plane are designated by open circles, those below by solid circles. (Figure (b) from W. T. Read, Jr., *Dislocations in Crystals*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1953.)

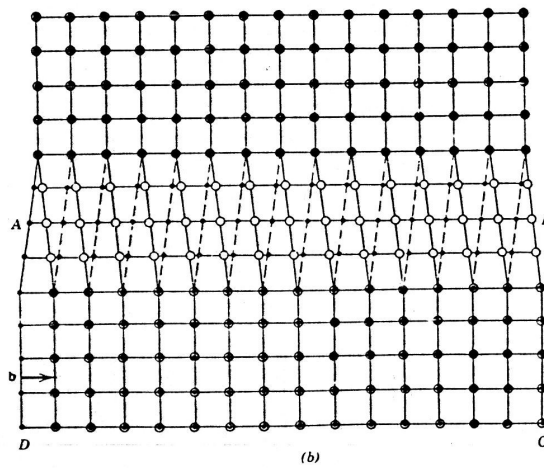
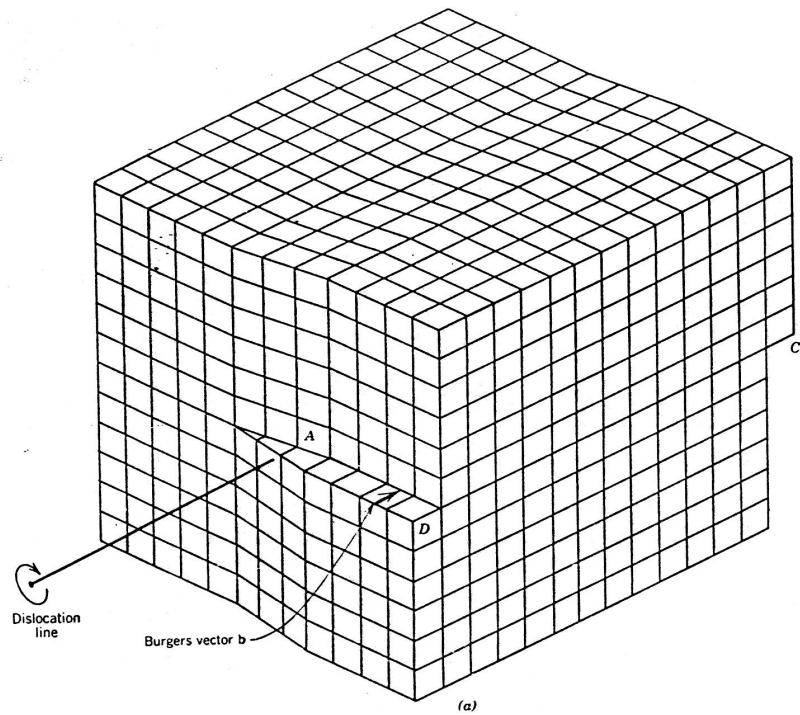
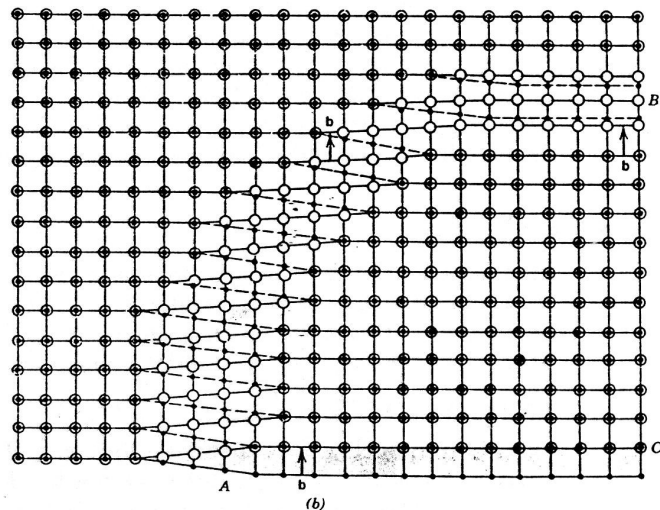
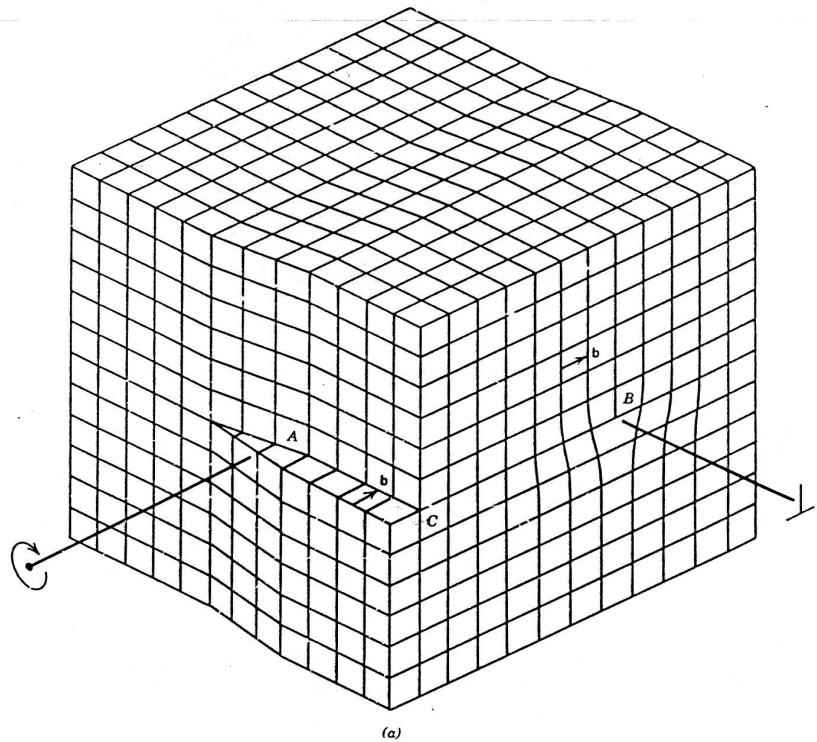


FIGURE 4.5 (a) Schematic representation of a dislocation that has edge, screw, and mixed character. (b) Top view, where open circles denote atom positions above the slip plane. Solid circles, atom positions below. At point A, the dislocation is pure screw, while at point B, it is pure edge. For regions in between where there is curvature in the dislocation line, the character is mixed edge and screw. (Figure (b) from W. T. Read, Jr., *Dislocations in Crystals*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1953.)



Cacat Antar Muka

Cacat antar muka adalah batas yang mempunyai dua dimensi yang biasanya memisahkan daerah-daerah pada material yang mempunyai struktur kristal dan/atau orientasi kristalografi yang berbeda. Cacat jenis ini antara lain: *permukaan luar*, *batas butir*, *batas kembar*, *kesalahan tumpukan* dan *batas fasa*.

Permukaan Luar

Satu dari batas yang paling jelas adalah permukaan luar/eksternal, dimana struktur kristal berakhir. Atom-atom permukaan tidak terikat ke semua atom terdekat, dan karenanya akan mempunyai tingkat energi yang lebih tinggi daripada atom-atom di

bagian dalam. Ikatan atom-atom permukaan ini yang tak terpenuhi memberikan kenaikan energi permukaan, dinyatakan dalam satuan energi per satuan luas (J/m^2). Untuk menurunkan energi ini, material jika memungkinkan cenderung meminimalkan luas permukaan total.

Batas Butir

Batas butir memisahkan dua butir atau kristal kecil yang mempunyai orientasi kristalografi yang berbeda pada material polikristal. Batas butir secara skematik digambarkan pada gambar 4.7. Didalam batas butir terdapat atom yang tak bersesuaian pada daerah transisi dari orientasi kristal butir satu ke butir lai didekatnya.

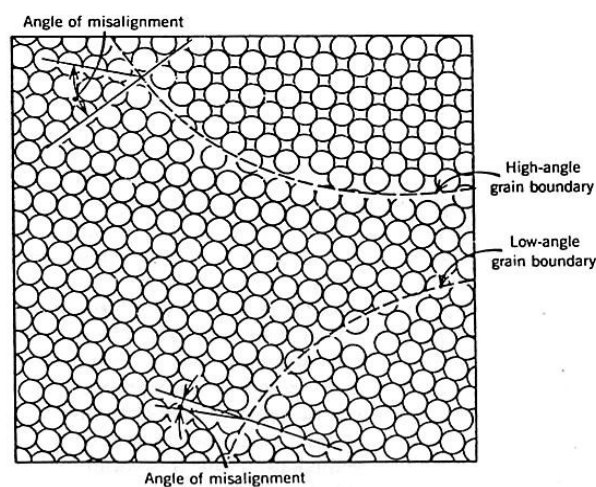


FIGURE 4.7 Schematic diagram showing low- and high-angle grain boundaries and the adjacent atom positions.

Batas Kembar

Batas kembar adalah batas butir tipe khusus dimana terdapat simetri kisi cermin, yaitu atom-atom pada sebuah sisi batas berada pada posisi cermin dari atom-atom pada sisi lainnya (ambar 4.9). Daerah antara batas butir ini disebut *kembar/twin*.

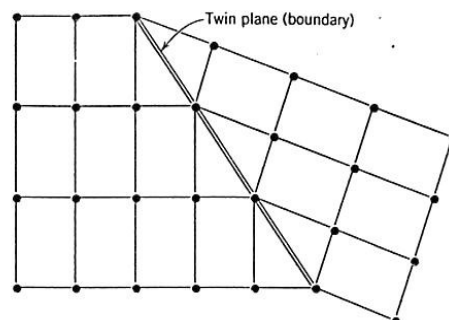


FIGURE 4.9 Schematic diagram showing a twin plane or boundary and the adjacent atom positions (dark circles).

Cacat Bulk atau Volume

Cacat lainnya yang ada pada semua material padat dimana cacat ini lebih besar dari yang sudah dibicarakan adalah pori, retak, inklusi benda asing dan fasa-fasa lainnya. Cacat-cacat ini timbul biasanya selama tahap-tahap proses dan pabrikan.

Soal-soal

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan cacat atom vakansi dan interstisi diri.
2. Apa perbedaan antara cacat dislokasi sisi dan dislokasi ulir.
3. Jelaskan apa yang dimaksud dengan cacat batas kembar.
4. Hitunglah fraksi sisi atom yang kosong untuk tembaga yang mempunyai temperatur leleh 1084°C (1357 K). Asumsikan energi untuk pembentukan vakansi $0,90\text{ eV/atom}$.
5. Hitunglah jumlah vakansi per meter kubik untuk logam besi pada 850°C . Energi untuk pembentukan vakansi adalah $1,08\text{ eV/atom}$. Kerapatan dan berat atom besi masing-masing adalah $7,65\text{ g/cm}^3$ dan $55,85\text{ g/mol}$.
6. Hitunglah energi pembentukan formasi vakansi pada aluminium, dimana jumlah kesetimbangan vakansi pada 500°C (773 K) adalah $7,57 \times 10^{23}\text{ m}^{-3}$. Berat atom dan kerapatan aluminium pada 5000 C masing-masing adalah $26,98\text{ g/mol}$ dan $2,62\text{ g/cm}^3$.
7. Berapakah komposisi atom (dalam persen atom) untuk paduan yang terdiri dari 30 wt\% Zn dan 70 wt\% Cu .

BAB IV

SIFAT MEKANIK LOGAM

Sifat mekanik bahan adalah : hubungan antara respons atau deformasi bahan terhadap beban yang bekerja.

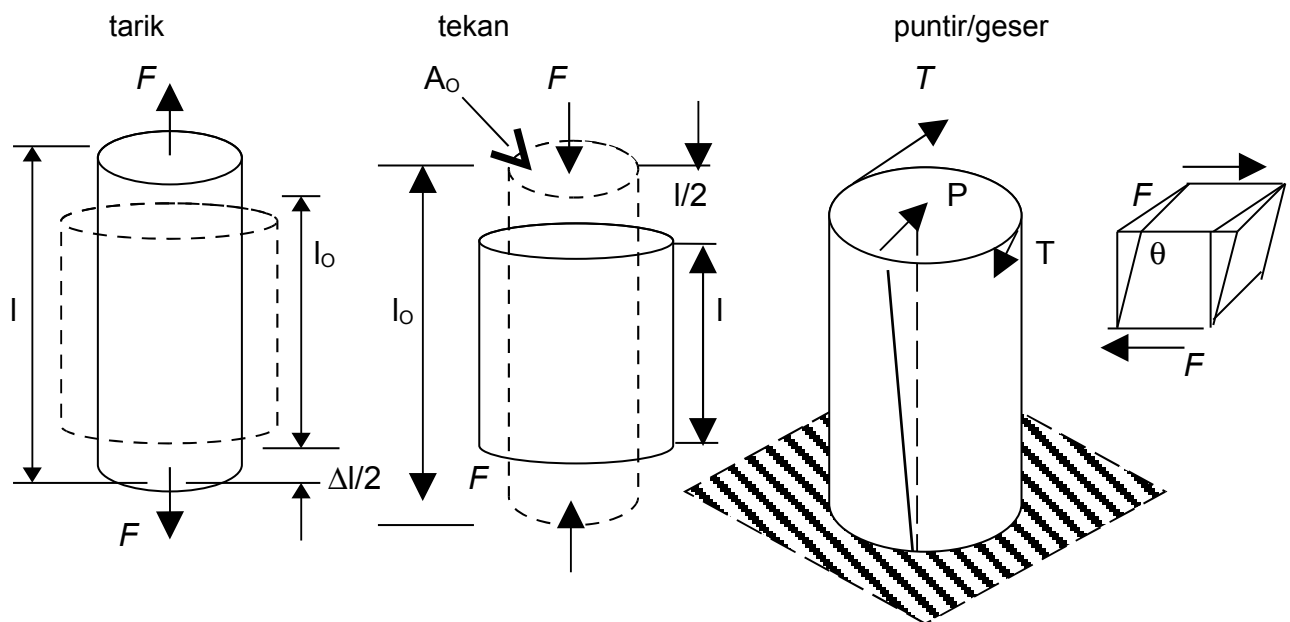
Sifat mekanik : berkaitan dengan kekuatan, kekerasan, keuletan, dan kekakuan.

Stress Dan Strain

Stress = tegangan .

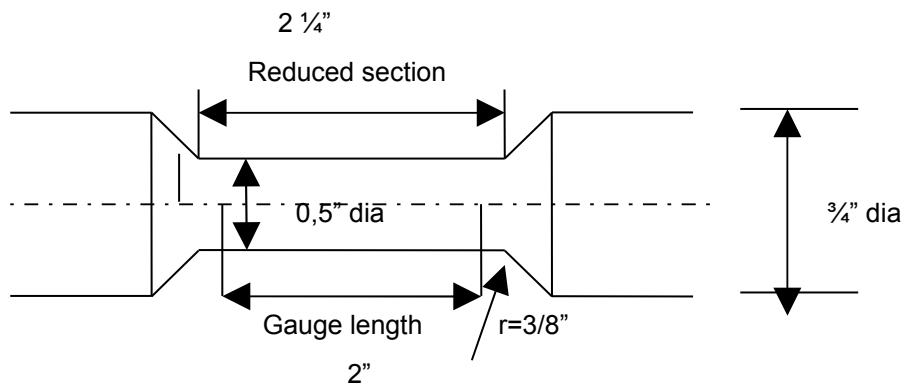
Strain = regangan .

Bahan dapat dibebani dengan 3 cara : tarik, tekan, geser (gunting).



Uji Tarik

Adalah salah satu uji stress-strain mekanik yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan bahan terhadap gaya tarik. Dalam pengujiannya, bahan uji ditarik sampai putus.



Engineering Strain :
(Regangan).

$$\epsilon = \frac{l_i - l_o}{l_o} = \frac{\Delta l}{l_o}$$

- l_o = panjang mula – mula
- l_i = panjang akhir
- Δl = pertambahan panjang
- ϵ = %

Engineering Stress :
(Tegangan teknik)

$$\sigma = \frac{F}{A_o}$$

- F = beban yang diberikan
(lb atau N)
- A_o = luas penampang bahan
sebelum dibebani
(in^2 atau m^2)
- σ = psi, MPa.

Uji tekan

Bahan uji diberikan gaya tekan. Rumus tegangan dan regangan sama dengan yang dipakai pada uji tarik, hanya tanda beban negative (tekan). Hasil uji akan memberikan harga negative.

tegangan geser di rumuskan :

$$\tau = \frac{F}{A_o}$$

- F = gaya yang diberikan
- A_o = luas bidang permukaan.

Regangan Geser

Regangan geser dilambangkan γ merupakan tangen θ .

Torsi

Torsi adalah variasi dari gaya geser murni. Bahan uji diberikan gaya puntir yang akan menimbulkan gerak putar pada sumbu penggerak atau mesin bor

Deformasi Elastis

Besarnya bahan mengalami deformasi atau regangan bergantung kepada besarnya tegangan. Pada sebagian besar metal, tegangan dan regangan adalah proporsional dengan hubungan :

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

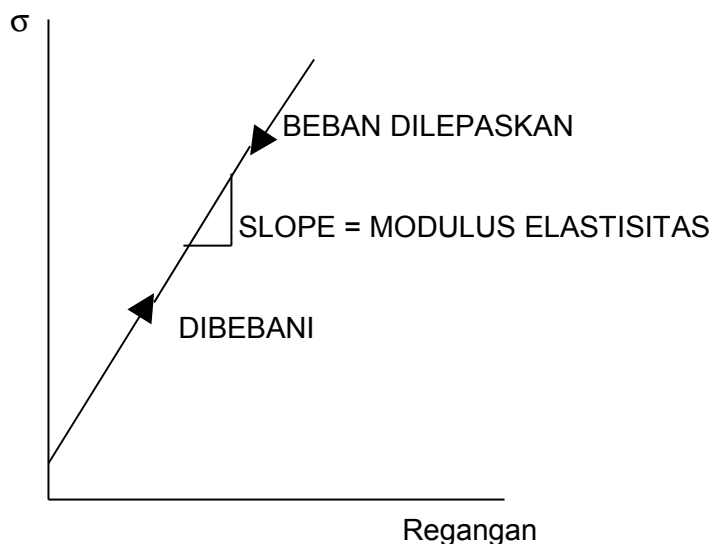
E = modulus elastistas atau modulus Young
(Psi, MPa).

Dikenal dengan **HUKUM HOOKE** .

Untuk logam harga E : $4,5 \times 10^4$ MPa S/D $40,7 \times 10^4$ MPa.

Bahan disebut mengalami DEFORMASI ELASTIS Jika tegangan dan regangan besarnya proporsional.

TEGANGAN



Deformasi elastis adalah tidak permanent, artinya jika beban dilepaskan maka bahan kembali ke bentuk semula.

Deformasi Elastis Non Linear

Modulus elastisitas dicari dengan modulus tangen atau modulus secant

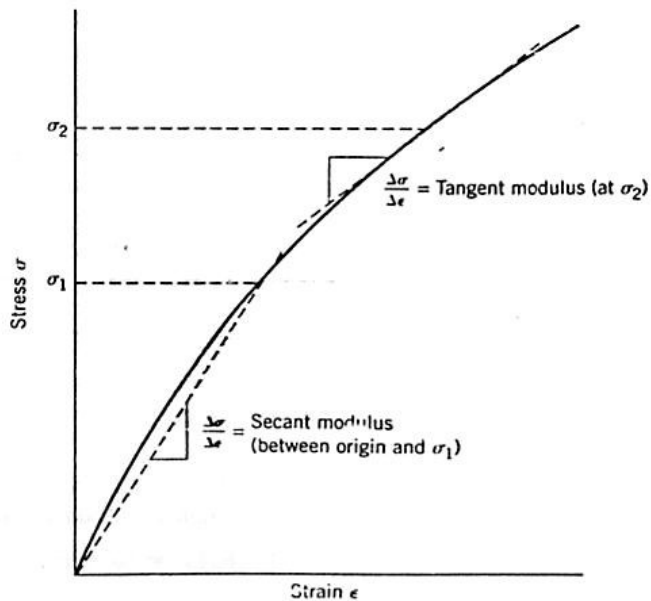


FIGURE 6.5 Schematic stress-strain diagram showing nonlinear elastic behavior, and how secant and tangent moduli are determined.

Dalam skala atom, deformasi elastis adalah perubahan jarak antar atom. Jadi besar modulus elastisitas adalah besarnya tahanan atom-atom yang berikatan

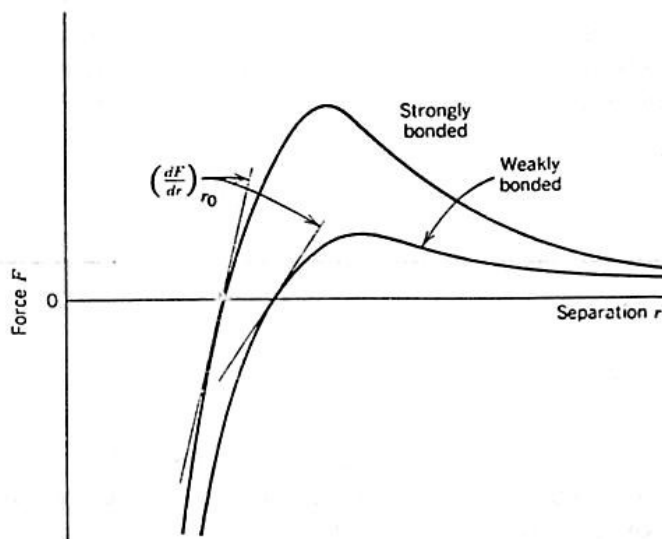


FIGURE 6.6 Force versus interatomic separation for weakly and strongly bonded atoms. The magnitude of the modulus of elasticity is proportional to the slope of each curve at the equilibrium interatomic separation r_0 .

Pada beban geser, tegangan dan regangan bisa dihubungkan dengan persamaan:

$$\tau = G \cdot \gamma$$

$$\tau = \text{Tegangan}$$

$$\gamma = \text{Regangan}$$

$$G = \text{Modulus Geser}$$

Contoh :

Sebuah potongan tembaga yang panjang awalnya 305 mm (12 inci) ditarik dengan tegangan 276 MPa (40.000 psi). Jika deformasi elastis, berapakah pertambahan panjang? ($E = 11 \times 10^4$ MPa (16×10^6 psi)).

Jawab :

$$\sigma = \varepsilon E = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot E$$

$$\Delta l = \frac{\sigma l_0}{E}$$

$$\sigma = 276 \text{ MPa}$$

$$l_0 = 305 \text{ mm}$$

$$E = 11 \times 10^4$$

$$\Delta l = \frac{276 \times 305}{11 \times 10^4}$$

$$= 0.76 \text{ mm}$$

$$(0.30 \text{ inci})$$

Sifat Elastis Bahan

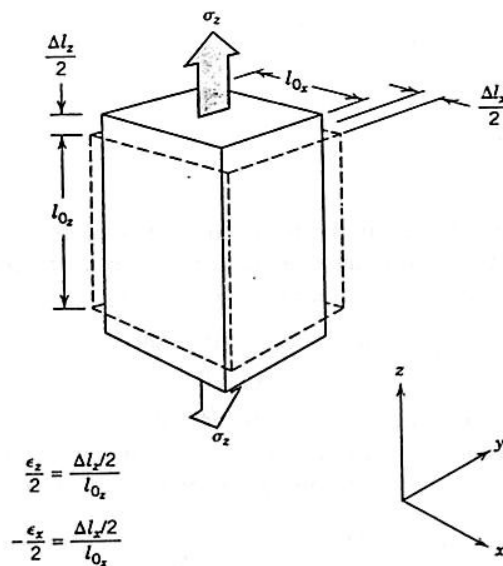


FIGURE 6.8 Axial (z) elongation (positive strain) and lateral (x and y) contractions (negative strains) in response to an imposed tensile stress. Solid lines represent dimensions after stress application; dashed lines, before.

Jika tegangan pada sumbu z

- arah sb z : perpanjangan
- arah sb x : perpendekan
- arah sb y : perpendekan

Perbandingan antara regangan tegak lurus terhadap regangan aksial disebut **rasio poisson**, ν .

$$\nu = \frac{-\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

Bahan isotropik, ν biasanya = 1/4.

Metal dan campurannya, $\nu = 0.25$ s/d 0.35

Modulus geser dan modulus elastik dihubungkan dengan memakai rasio poisson sbb:

$$E = 2 G (1 + \nu)$$

Contoh soal

Tegangan tarik diberikan sepanjang sumbu sebuah silinder yang terbuat dari kuningan dengan diameter 10 mm. Carilah besar beban yang diperlukan untuk menghasilkan perubahan diameter sebesar $2,5 \times 10^{-3}$ mm jika deformasi adalah elastis.

Jawab

Ketika beban diberikan, maka silindr akan mengalami perpanjangan di sumbu z dan pada saat yang sama mengalami pengurangan diameter, $\Delta d = 2,5 \times 10^{-3}$ mm pada arah x. Untuk tegangan di arah x:

$$\epsilon_x = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{-2,5 \times 10^{-3}}{10} = -2,5 \times 10^{-4}$$

harga negatif karena diameternya mengalami pengurangan penampang.

Regangan pada arah z :

Rasio poisson untuk kuningan adalah 0,34 (tabel:), maka

$$\epsilon_z = \frac{-\epsilon_x}{\nu} = \frac{-(-2,5 \times 10^{-4})}{0,34} = 7,35 \times 10^{-4}$$

Tegangan yang diberikan :

$$\sigma = \epsilon_z E = (7,35 \times 10^{-4})(97 \times 10^3) = 71,3 \text{ Mpa}$$

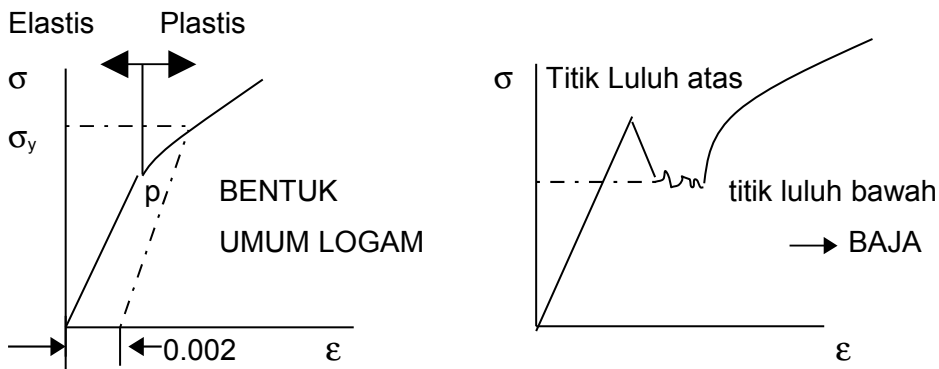
∴ Maka gaya yang diberikan:

$$F = \sigma A_0 = \sigma \left(\frac{d_0}{2} \right)^2 \pi$$

$$=(71,3 \times 10^6) \left(\frac{10 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 \pi = 5600 \text{ N}$$

Deformasi Plastis

Pada kebanyakan logam, deformasi elastis hanya terjadi sampai regangan 0.005. Jika bahan berdeformasi melewati batas elastis, tegangan tidak lagi proporsional terhadap regangan. Daerah ini disebut daerah plastis.



Pada daerah plastis, bahan tidak bisa kembali ke bentuk semula jika beban dilepaskan.

Pada tinjauan mikro : deformasi plastis mengakibatkan putusya ikatan atom dengan atom tetangganya dan membentuk ikatan yang baru dengan atom yang lainnya. Jika beban di lepaskan, atom ini tidak kembali keikatan awalnya.

Sifat Sifat Tarik

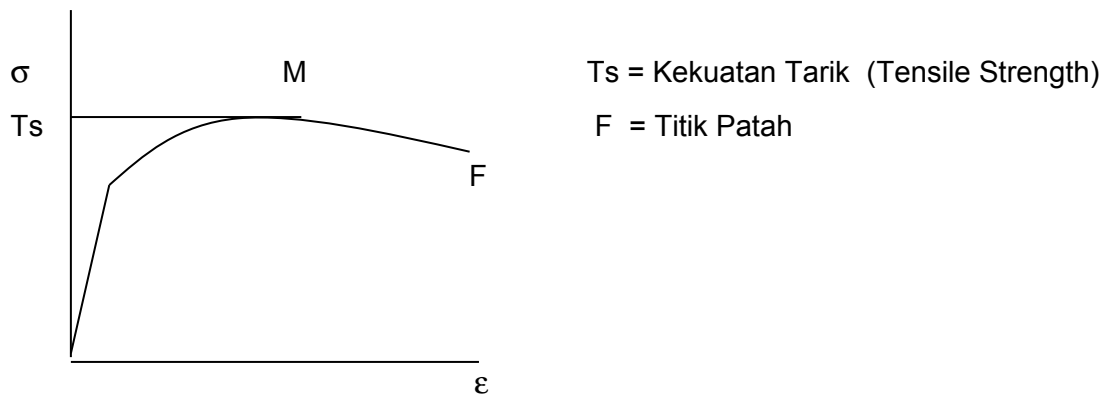
Luluh dan Kekuatan Luluh

Titik luluh terjadi pada daerah dimana deformasi plastis mudah terjadi pada logam grafik σ - ϵ berbelok secara bertahap sehingga titik luluh ditentukan dari awal perubahan kurva σ - ϵ dari linier ke lengkung. Titik ini di sebut batas proporsional (titik p pada gambar). Pada kenyataannya titik p ini tidak bisa ditentukan secara pasti. Kesepakatan di buat dimana di tarik garis lurus paralel, dengan kurva σ - ϵ dengan harga $\epsilon = 0.002$. Perpotongan garis ini dengan kurva σ - ϵ didefinisikan sebagai kekuatan luluh τ_y .

Kekuatan Tarik

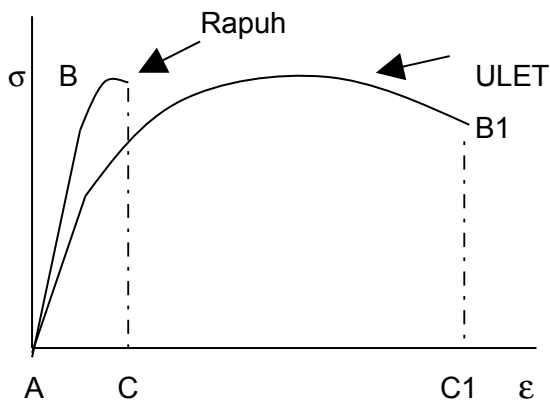
Setelah titik luluh, tegangan terus naik dengan berlanjutnya deformasi plastis sampai titik maksimum dan kemudian menurun sampai akhirnya patah.

Kekuatan tarik adalah tegangan maksimum pada kurva σ - ϵ . Hal ini berhubungan dengan tegangan maksimum yang bisa di tahan struktur pada kondisi tarik



Keuletan

Mengukur derajat deformasi plastis pada saat patah. Bahan yang mengalami sedikit atau tidak sama sekali deformasi plastis di sebut rapuh.



Keuletan bisa di rumuskan sebagai persen perpanjangan atau persen pengurangan luas.

$$\% EL = \frac{(l_F - l_0)}{l_0} \times 100$$

$$\% AR = \left(\frac{A - A_F}{A_0} \right) \times 100$$

l_F = panjang patah

l_0 = panjang awal

% EL = % perpanjangan

A_0 = luas penampang mula-mula

A_F = luas penampang pada saat patah

%AR = % pengurangan luas penampang

Bahan dianggap rapuh jika regangan pada saat patah kira-kira 5%.

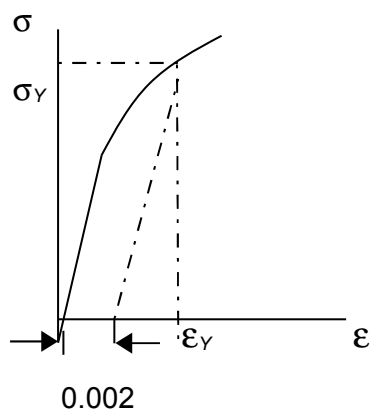
Sifat mekanik beberapa logam, dan paduan

LOGAM	KEKUATAN LULUH (PSi (MPa))	KEKUATAN TARIK (PSi (MPa))	KEULETAN. % EL (in : 2 INCHI)
EMAS	-	19.000 (130)	45
ALUMINIUM	400 (28)	10.000 (69)	45
TEMBAGA	10.000 (69)	29.000(200)	45
BESI	19.000 (130)	38.000 (262)	45
NIKEL	20.000 (138)	70.000 (480)	40
TITANIUM	35.000 (240)	48.000 (330)	30
MOLIB DENUM	82.000 (565)	95.000 (655)	35

Resilience

Adalah kapasitas material untuk menyerap energi ketika mengalami deformasi elastis dan ketika beban dilepaskan, energi ini juga dilepaskan.

Modulus resilience, U_r : adalah energi regang persatuan volume yang diperlukan sehingga material mendapat tegangan dari kondisi tidak berbeban ketitik luluh.



$$U_r = \int_0^{\epsilon_Y} \sigma \, d\epsilon$$

Daerah elastis linier :

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_Y \epsilon_Y \text{ (J/M}^3\text{)}$$

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_Y \epsilon_Y = \frac{1}{2} \sigma_Y \left(\frac{\sigma_Y}{E} \right) = \frac{\sigma_Y^2}{2E}$$

Material yang mempunyai sifat resilience adalah material yang mempunyai tegangan luluh tinggi (σ_y) dan modulus elastisitas rendah. Contoh : alloy untuk pegas.

Ketangguhan (Toughness).

Adalah kemampuan bahan untuk menyerap energi sampai patah.

Satuan ketangguhan = satuan resilience

bahan ulet -> bahan tangguh

bahan getas -> bahan tidak tangguh

Tegangan dan Regangan Sebenarnya

Tegangan dan regangan sebenarnya diukur berdasarkan luas penampang sebenarnya pada saat diberikan beban.

$$\sigma_T = \frac{F}{A_i}$$

σ_t = tegangan sebenarnya

(true stress)

A_i = luas penampang pada saat dibebani

$$\epsilon_T = \ln \frac{l_i}{l_o}$$

ϵ_T = regangan sebenarnya

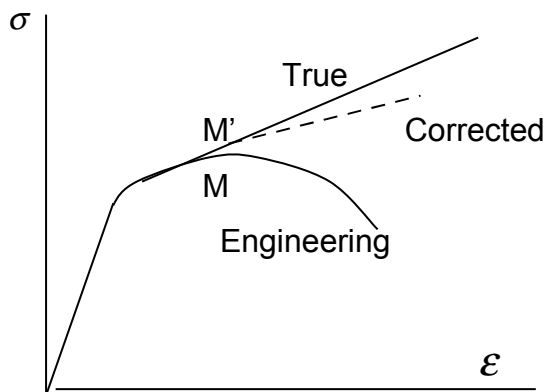
l_i = panjang bahan yang pada saat diberi beban

Jika tidak ada perubahan volume :

$$A_i l_i = A_o l_o$$

$$\sigma_T = \sigma (1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_T = \ln (1 + \epsilon)$$



Untuk beberapa logam dan paduan, tegangan sebenarnya pada kurva σ - ϵ pada daerah mulai terjadinya deformasi plastis ke kondisi terjadinya necking (pengecilan penampang) dirumuskan :

$$\sigma_T = K \epsilon_T^n$$

K, n = Konstan
 $n < 1$

Harga n Dan K Untuk berbagai paduan

Bahan	n	K	
		psi	MPa
• Baja karbon rendah (Dianil)	0,26	77.000	530
• Baja campuran (Tipe 4340, Dianil)	0,15	93.000	640
• Stainless steel (Tipe 304, Dianil)	0,45	185.000	1275
• Alumunium (Dianil)	0,20	26.000	180
• Alumunium paduan (Tipe 2024, Perluasan Panas)	0,16	100.000	690
• Tembaga (Dianil)	0,54	46.000	315
• Perunggu (70-Cu-30 Zn Dianil)	0,49	130.000	895

Contoh soal

Sebuah spesimen silinder dari baja mempunyai diameter awal 12,8 mm diuji tarik hingga patah. Kekuatan patah tekniknya diperoleh $\sigma_f = 460$ MPa. Jika diameter patahnya adalah 10,7 mm, carilah:

- keuletan dalam persen pengurangan penampang.
- tegangan sebenarnya pada saat patah.

Jawab

- Keuletan dihitung dari rumus berikut:

$$\begin{aligned} \% AR &= \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 = \frac{\left(\frac{12,8}{2}\right)^2 \pi - \left(\frac{10,7}{2}\right)^2 \pi}{\left(\frac{12,8}{2}\right)^2 \pi} \times 100 \\ &= \frac{128,7 - 89,9}{128,7} \times 100 = 30\% \end{aligned}$$

- Tegangan sebenarnya:

Beban pada saat patah:

$$F = \sigma_f A_0 = (460 \times 10^6)(128,7 \times 10^{-6}) = 59.200 \text{ N}$$

- ∴ tegangan sebenarnya:

$$\sigma_T = \frac{F}{A_f} = \frac{59.200}{89,9 \times 10^{-6}} = 6,6 \times 10^8 \text{ N/m}^2 = 660 \text{ MPa}$$

Kekerasan (hardness)

Kekerasan adalah mengukur ketahanan material terhadap deformasi plastis yang terlokalisasi (lengkungan kecil atau goresan).

Macam- macam uji kekerasan :

- Uji kekerasan Rockwell
- Uji kekerasan Brinell
- Uji kekerasan Vicker
- Uji kekerasan Knoop

Uji Kekerasan Rockwell

Metode yang paling umum digunakan karena simpel dan tidak menghendaki keahlian khusus. Digunakan kombinasi variasi indenter dan beban untuk bahan metal dan campuran mulai dari bahan lunak sampai keras.

Indenter : - bola baja keras

ukuran 1/16 , 1/8 , 1/4 , 1/2 inci (1,588; 3,175; 6,350; 12,70 mm)

- intan kerucut

Hardness Number (nomor kekerasan) ditentukan oleh perbedaan kedalaman penetrasi indenter, dengan cara memberi beban minor diikuti beban major yang lebih besar.

Berdasarkan besar beban minor dan major, uji kekerasan rockwell dibedakan atas 2 :

- rockwell

- rockwell superficial : untuk bahan tipis

Uji kekerasan rockwell : - beban minor : 10 kg

- beban major : 60, 100, 150 kg

Uji kekerasan rockwell superficial :

- beban minor : 3 kg

- beban major : 15, 30, 45, kg

Skala kekerasan :

- Rockwell

Simbol	Indenter	Beban Major (kg)
A	INTAN	60
B	BOLA $\frac{1}{16}$ INCHI	100
C	INTAN	150

D	INTAN	100
E	BOLA $\frac{1}{8}$ INCHI	100
F	BOLA $\frac{1}{16}$ INCHI	60
G	BOLA $\frac{1}{16}$ INCHI	150
H	BOLA $\frac{1}{8}$ INCHI	60
K	BOLA $\frac{1}{8}$ INCHI	150

- Rockwell Superficial

Simbol	Indenter	Beban Major (kg)
15 N	INTAN	15
30 N	INTAN	30
45 N	INTAN	45
15 T	BOLA $\frac{1}{16}$ INCHI	15
30 T	BOLA $\frac{1}{16}$ INCHI	30
45 T	BOLA $\frac{1}{16}$ INCHI	45
15 W	BOLA $\frac{1}{8}$ INCHI	15
30 W	BOLA $\frac{1}{8}$ INCHI	30
45 W	BOLA $\frac{1}{8}$ INCHI	45

Contoh : - skala 80 HRB : kekerasan rockwell 80 skala B.
 - skala 60 HR 30 W : kekerasan superficial 60 pada skala 30 W.
 maksimum skala : 130

Jika skala kekerasan < 20 atau > 100 maka hasil kurang teliti, gunakan skala dibawahnya atau diatasnya.

Uji Kekerasan Brinell

Indenter : - Bola baja keras ; diameter 10 mm (0,394")
 - Tungsten carbide ; diameter 10 mm (0.394")

Beban : 500 - 3000 kg, step 500 kg

Angka kekerasan brinell adalah fungsi beban dan diameter lobang hasil, dirumuskan:

$$HB = \frac{2P}{\pi D [D - (D^2 - d^2)^{1/2}]}$$

P = Beban
 D = diameter indenter
 d = diameter lubang

Uji Kekerasan Mikro Knoop dan Vickers

Indenter : intan piramid

Beban : 1 - 1000 gr

Hasil test berupa lekukan diperiksa dengan mikroskop

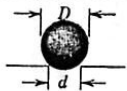



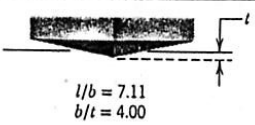

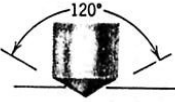



HK = hardness number Knoop (KHN)

HV = hardness number Vickers (VHN)

Knoop dan Vickers digunakan untuk uji kekerasan mikro

- daerah kecil dr spesimen
- uji bahan getas : keramik.

Table 6.4 Hardness Testing Techniques

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	{ Diamond cone 1/8, 1/4, 1/2 in. diameter steel spheres }			{ 60 kg 100 kg 150 kg } Rockwell { 15 kg 30 kg 45 kg } Superficial Rockwell	
					

^a For the hardness formulas given, P (the applied load) is in kg, while D, d, d₁, and l are all in mm.

Source: Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

Safety Factor (Faktor Keamanan).

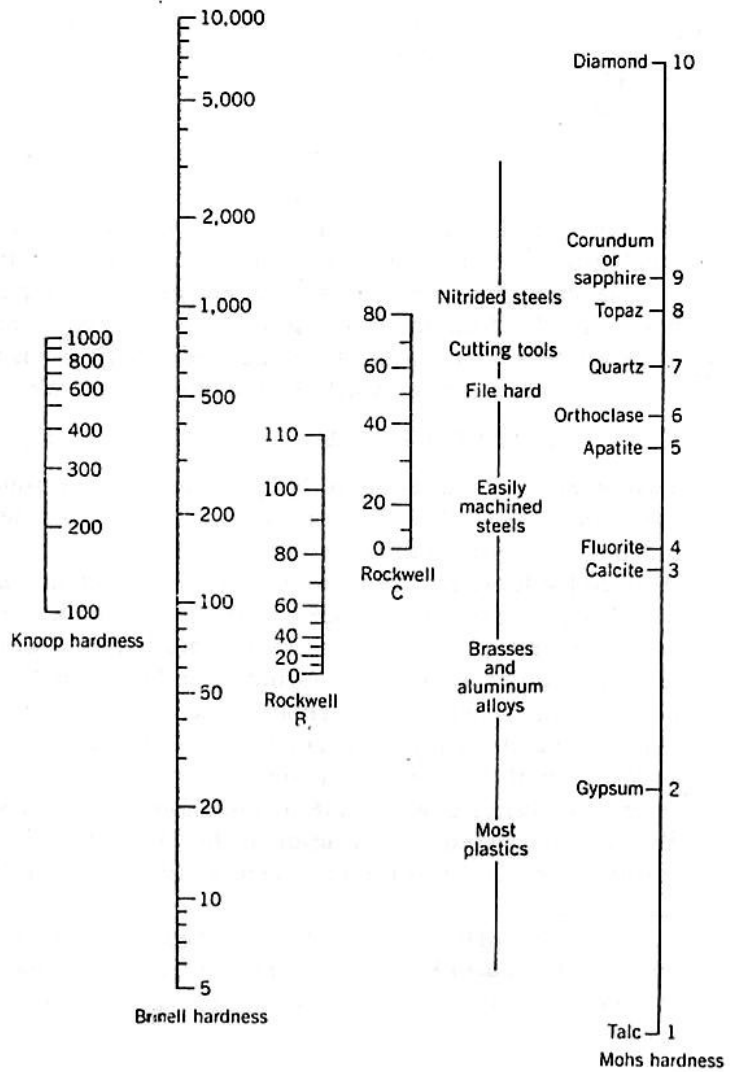
Pada kenyataannya bahan teknik mempunyai sifat mekanik yang variabel, disamping itu pada aplikasi sering beban pada bahan tidak pasti, sehingga perhitungan tegangan hanya pendekatan.

Karena itu kelonggaran disain harus dibuat untuk mencegah kegagalan yang tidak diharapkan, untuk itu digunakan istilah “tegangan aman” atau “tegangan kerja”.

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{N}$$

dimana: σ_w = tegangan kerja
 σ_y = tegangan luluh
 N = faktor keamanan
 N biasanya 1,2 S/D 4,0

FIGURE 6.17
 Comparison of several
 hardness scales.
 (Adapted from G. F.
 Kinney, *Engineering
 Properties and
 Applications of Plastics*,
 p. 202. Copyright
 © 1957 by John
 Wiley & Sons, New
 York. Reprinted by
 permission of John
 Wiley & Sons, Inc.)



Soal-soal

1. Sebuah spesimen tembaga yang mempunyai penampang segi empat dengan ukuran $15,2 \text{ mm} \times 19,1 \text{ mm}$, ditarik dengan gaya 44.500 N , menghasilkan hanya defor,asi elastis. Hitunglah regangan yan dihasilkan.
2. Sebuah spesimen silinder dari paduan nikel mempunyai modulus elastisitas 207 GPa dan diameter awal $10,2 \text{ mm}$ mengalami hanya deformasi elastis ketika dibebani dengan tarikan sebesar 8900 N . Hitunglah panjang spesimen sebelum deformasi jika perpanjangan maksimum yang diperbolehkan adalah $0,25 \text{ mm}$.
3. Misalkan sebuah kawat titanium dengan diameter $3,0 \text{ mm}$ dan panjang $2,5 \times 10^4$. Hiktunglah perpanjangannya jika diberikan beban 500 N . asumsikan bahwa deformasi yang terjadi adalah elastis.
4. Untuk paduan perunggu, tegangan dimana mulai terjadi deformasi plastis adalah 275 MPa dan modulus elastisitasnya adalah 115 GPa .
 - a. Berapakah beban maksimum yang dapat diberikan ke spesimen yan mempunyai luas penampang 325 mm^2 tanpa terjadi deformasi plastis?
 - b. Jika panjang awal spesimen adalah 115 mm , berapakah panjang maksimum dimana bahan bisa diregang tanpa menyebabkan deformasi plastis.
5. Sebuah spesimen berbentuk silinder dengan diameter 8 mm , diberi tegangan secara elastis dalam tarikan. Gaya sebesar 15.700 N menghasilkan pengurangan diameter spesimen sebesar $5 \times 10^{-3} \text{ mm}$. Hitunglah rasio Poisson untuk spesimen ini jika modulus elastisitasnya 140 GPa .

BAB V

DIAGRAM FASE

ISTILAH-ISTILAH

- Komponen : adalah logam murni atau senyawa yang menyusun suatu logam paduan.

Contoh : Cu - Zn (perunggu), komponennya adalah Cu dan Zn

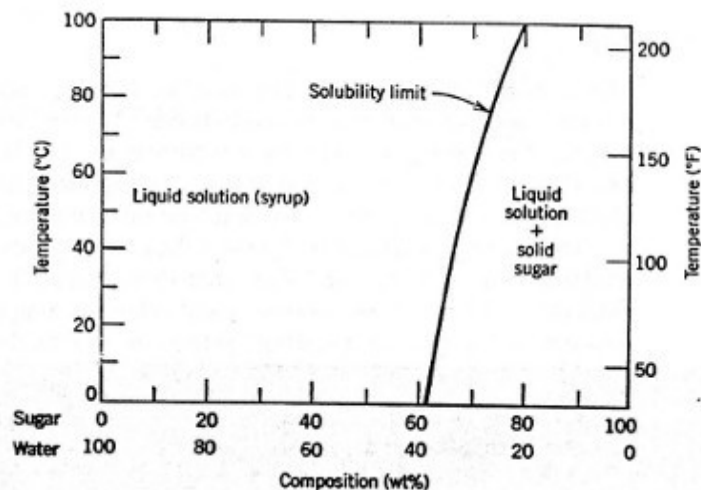
- Solid solution (larutan padat) : terdiri dari beberapa atom, minimal dua atom yang berbeda, atom terlarut menempati posisi substitusi atau interstisi pada kisi pelarut dan struktur kristal mengikuti struktur kristal pelarut.

- Batas kelarutan (solubility limit).

Suatu logam paduan akan mempunyai maksimum konsentrasi dari atom terlarut yang akan larut pada pelarut.

Jika atom terlarut konsentrasinya melampaui batas kelarutan maka sebagian atom tersebut tidak akan terlarut lagi. Untuk menggambarkan keadaan ini bisa dilihat contoh larutan air gula. Jika gula yang dicampur terlalu banyak maka gula tersebut tidak akan larut lagi (lihat grafik 9.1).

FIGURE 9.1 The solubility of sugar ($C_{12}H_{22}O_{11}$) in a sugar-water syrup.



- Fase:

Fase didefinisikan sebagai sistem yang homogen yang mempunyai sifat kimia dan sifat fisika yang seragam/uniform.

Satu fase : contohnya logam murni, padatan, cairan.

Lebih 1 fase : contohnya larutan air-gula dengan gula (larutan air-gula yang melampaui batas kelarutan).

Sistem fase tunggal → homogen

Sistem 2 atau lebih fase → campuran atau sistem heterogen.

- Struktur mikro :

Sifat-sifat fisik suatu bahan seperti sifat mekanik tergantung dari struktur mikro. Struktur mikro diketahui dengan observasi mikroskopik menggunakan mikroskop optik atau mikroskop elektron.

Pada logam paduan, penggolongan struktur mikro berdasarkan berapa jumlah fase, proporsinya dan bagaimana susunannya didalam bahan.

Struktur mikro bergantung kepada jumlah elemen paduan, konsentrasinya dan perlakuan panasnya (temperatur, lamanya pemanasan, laju pendinginan).

- Kesetimbangan fase

Kesetimbangan : jika sebuah sistem mempunyai energi bebas minimum pada temperatur, tekanan dan komposisi tertentu → tidak terjadi perubahan kondisi

Makin tinggi energi bebas → gerak atom pada bahan makin acak dan tidak teratur.

Secara makro : sifat-sifat sistem tidak berubah terhadap waktu → stabil

Kesetimbangan fase : adalah kesetimbangan pada sistem yang terdiri lebih dari 1 fase. Masing-masing fase tidak mengalami perubahan.

DIAGRAM KESETIMBANGAN FASE.

Banyak informasi tentang pengontrolan struktur mikro pada paduan logam tertentu lebih memudahkan jika digambar dalam bentuk diagram yaitu diagram fase atau diagram kesetimbangan.

Banyak perubahan struktur mikro terjadi pada saat transformasi fase yaitu perubahan yang terjadi diantara dua fase atau lebih karena temperatur berubah. Gejalanya bisa berupa transisi dari satu fase ke fase lain atau terbentuk fase baru atau hilangnya sebuah fase. Diagram kesetimbangan fase menggambarkan hubungan antara temperatur dan komposisi dan kuantitas fase-fase pada kesetimbangan.

Paduan biner : (binary alloy) adalah paduan yang terdiri dari dua komponen (contoh : Cu – Ni)

Diagram fase paduan biner Cu – Ni bisa dilihat pada gambar 9.2.

Sumbu y : temperatur

Sumbu x : komposisi paduan (dalam % berat – bawah, dalam % atom – atas).

3 daerah pada kurva : - α (fase α) → struktur fcc

- L (fase cair)

- $\alpha + L$ (fase $\alpha + \text{cair}$).

Fase α adalah solid solution Ni – Cu \rightarrow substitusi

Solid solution Ni – Cu : - Ni dan Cu sama – sama mempunyai struktur FCC.
- jari –jari atom yang hampir sama.
- elektro-negatif yang hampir sama.
- valensi yang sama.

- Garis liquidus : garis antara l dan $\alpha + L$.
- Garis solidus : garis antara α dan $\alpha + L$.

Pada sistem biner, jika diketahui komposisi dan temperatur kesetimbangan, 3 informasi yang diperoleh :

1. Fase paduan
2. Komposisi fase
3. Persen atau fraksi fase.

Mencari komposisi fase pada daerah 2 fase :

- titik B pada gb. 9.2 : (35 wt% Ni – 65 wt% Cu pada 1250^o C)

1. Tarik garis horisontal melalui B (“tie line”)
2. Tandai perpotongan garis dengan kurva di kedua garis
3. Tarik garis tegak lurus pada perpotongan kurva terhadap sumbu x, komposisi paduan bisa didapat.

- Perpotongan dengan garis liquidus C_L : 31,5 wt% Ni – 68,5 wt% Cu (gambar 9.2b)

- Perpotongan dengan garis solidus C_α : 42,5 wt% Ni – 57,5 wt% Cu

Mencari persen atau fraksi fase

- Pada daerah 1 fase : titik A pada gb. 9.2b
 $\rightarrow 100\% \alpha$.

- Pada daerah 2 fase : titik B pada gb 9.2b :

Digunakan garis horisontal (tie line) dan prosedur lever rule (hukum tuas).

Prosedurnya hukum tuas sbb:

1. Tarik garis horisontal pada temperatur yang diketahui (titik B) (garis tie line).
2. Diperoleh komposisi alloy keseluruhan, C_o .
3. Fraksi sebuah fase dihitung dengan mengambil panjang dari komposisi alloy keseluruhan, C_o ke batas fase yang lainnya dan dibagi dengan panjang total tie line (panjang $C_L - C_\alpha$).
4. Fraksi fase yang lain dilakukan dengan cara yang sama.

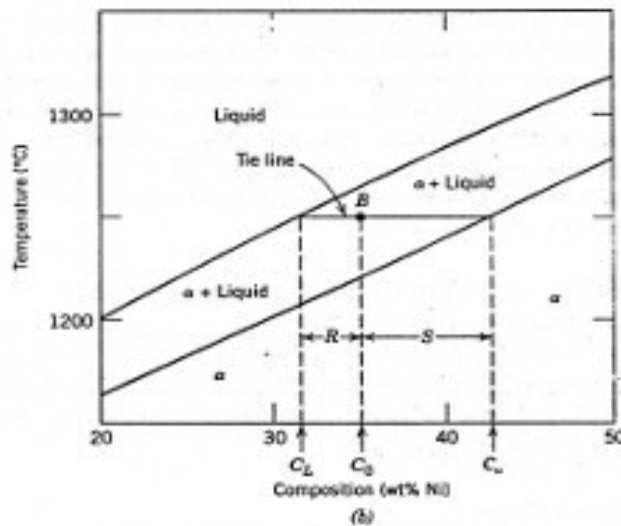
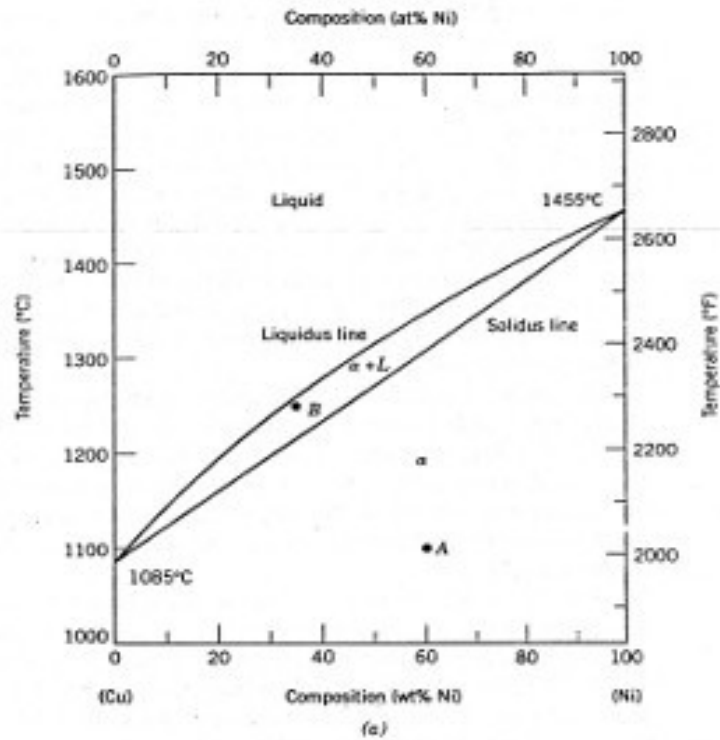


FIGURE 9.2 (a) The copper-nickel phase diagram. (Adapted from *Phase Diagrams of Binary Nickel Alloys*, P. Nash, Editor, 1991. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.) (b) A portion of the copper-nickel phase diagram for which compositions and phase amounts are determined at point B.

5. Jika diinginkan dalam persen, fraksi dikali 100. Jika komposisi dalam % berat, maka fraksi adalah fraksi massa (berat).

$$W_L = \frac{S}{R + S} \qquad W_L = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L}$$

W_L = fraksi berat fase L

C_α = komposisi fase α

C_L = komposisi fase L

C_0 = komposisi keseluruhan

Sebagai contoh, lihat gambar 9.2.

$$W_L = \frac{42,5 - 35}{42,5 - 31,5} = 0,68$$

Dengan cara yang sama untuk fase α

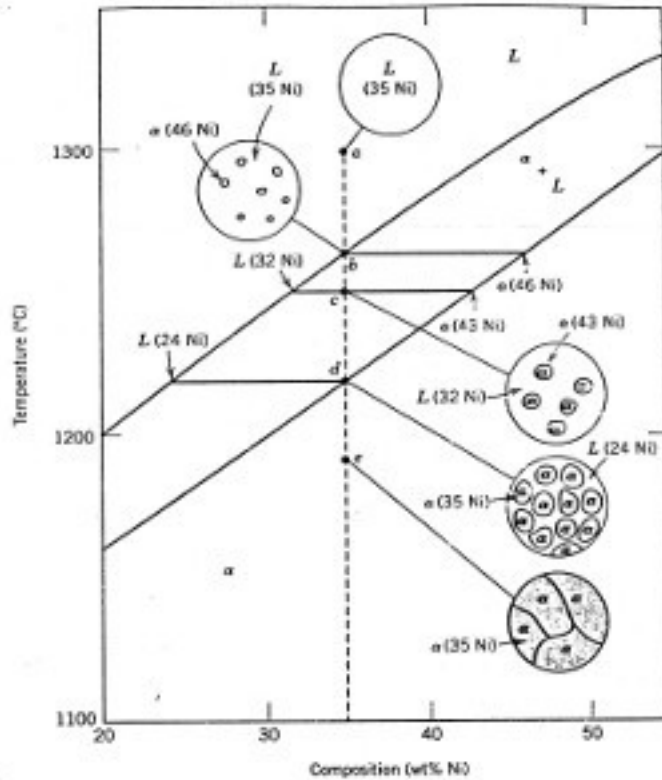
$$\begin{aligned} W_\alpha &= \frac{R}{R+S} \\ &= \frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_L} \\ &= \frac{35 - 31,5}{42,5 - 31,5} = 0,32 \end{aligned}$$

PERKEMBANGAN STRUKTUR MIKRO

Pada gambar 9.3 diperlihatkan diagram fase Cu – Ni, jika pendinginan terjadi sangat lambat dari fase L ke fase α untuk bahan 35 wt% Ni – 65 wt% Cu dari temperatur 1300 °C maka terjadi :

TITIK a = fase L : 35 Wt% Ni.
 Fase α : -
 b = Fase L : 35 Wt% Ni.
 Fase α : 49 Wt% Ni.
 c = Fase L : 30 Wt% Ni.
 Fase α : 43 Wt% Ni.
 d = Fase L : 23 Wt% Ni.
 Fase α : 35 Wt% Ni.
 e = Fase L : 35 Wt% Ni.

FIGURE 9.3 Schematic representation of the development of microstructure during the equilibrium solidification of a 35 wt% Ni-65 wt% Cu alloy.



Jika pendinginan terjadi lebih cepat maka terjadi segregasi yaitu distribusi yang tidak merata yang terjadi di dalam butir. Pada pusat butir yang pertama membeku akan kaya oleh bahan yang mempunyai titik leleh tinggi, bahan yang mempunyai titik leleh rendah akan naik menjauhi pusat butir. Jadi terjadi gradien konsentrasi pada butir (gb. 9.4). Fenomena ini disebut “cored structure”.

Kelemahan “cored structure” :

- jika dipadatkan, akan cepat meleleh.
- mengurangi kekuatan mekanik pada temperatur tinggi.

Komposisi bahan akan mempengaruhi kekuatan tarik dan keuletan bahan tersebut (gb. 9.5).

FIGURE 9.4 Schematic representation of the development of microstructure during the nonequilibrium solidification of a 35 wt% Ni–65 wt% Cu alloy.

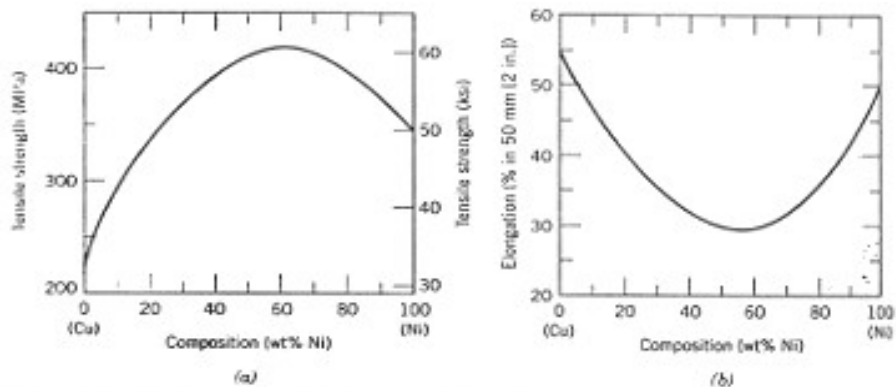
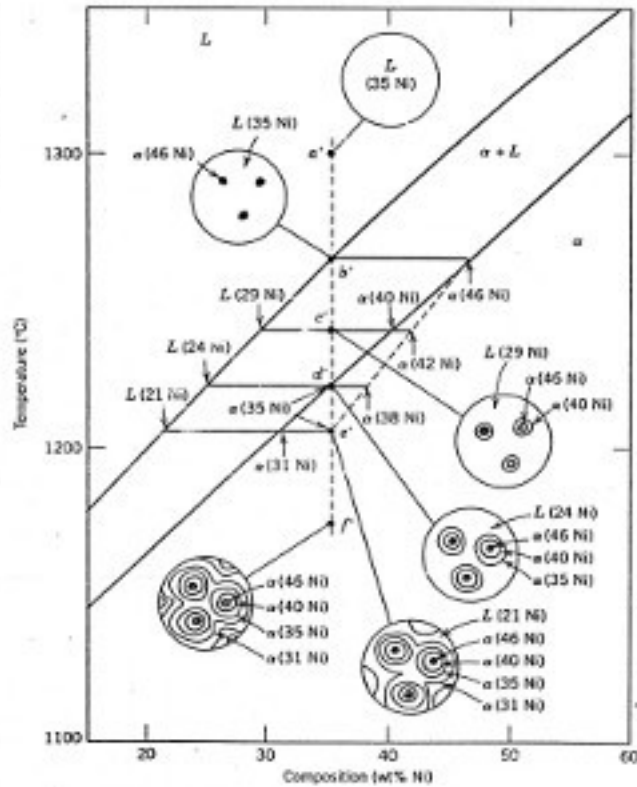


FIGURE 9.5 For the copper–nickel system, (a) tensile strength versus composition, and (b) ductility (%EL) versus composition at room temperature. A solid solution exists over all compositions for this system.

SISTEM EUTECTIC BINER :

Reaksi eutectic : phase liquid berubah menjadi dua fase padat pada proses pendinginan.



Diagram fase untuk reaksi eutectic adalah paduan Cu – Ag. (gb. 9.6).

Pada diagram fase Cu – Ag terdapat tiga daerah 2 fase yaitu : $\alpha + L$, $\beta + L$, $\alpha + \beta$

α adalah fase kaya Cu.

β adalah fase kaya Ag.

Titik E : titik eutectic.

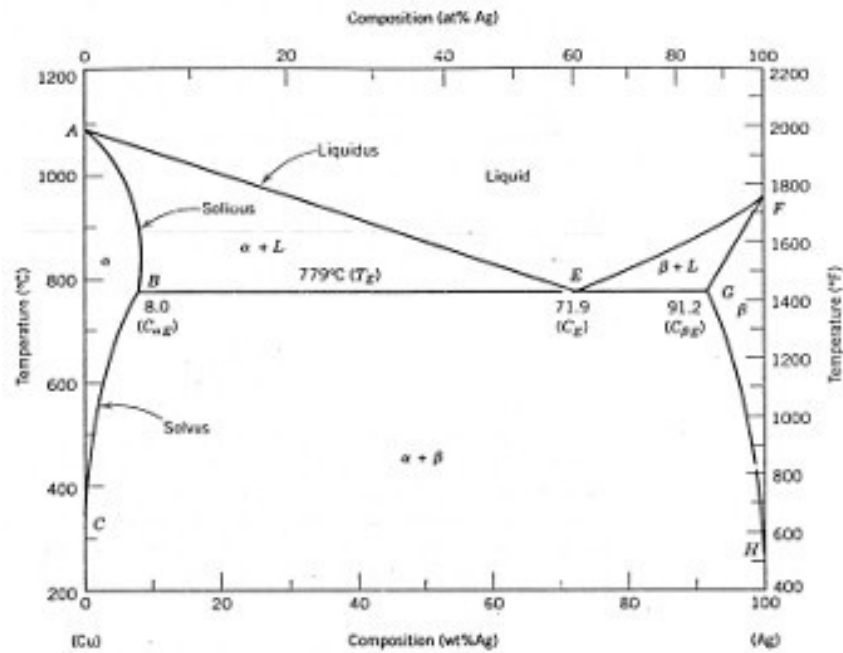


FIGURE 9.6 The copper-silver phase diagram. (Adapted from *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd edition, Vol. 1, T. B. Massalski, Editor-in-Chief, 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

PERKEMBANGAN STRUKTUR MIKRO PADA PADUAN EUTECTIC.

Perubahan mikro struktur untuk bahan Pb – Sn bisa dilihat pada gb. 9.9, 9.10, 9.11.

Pada gambar 9.9 adalah terbentuknya fase tunggal α pada pendinginan dari temperatur 350 °C, 2 wt% Sn s/d 20 °C.

Pada gambar 9.10 adalah terbentuknya fase $\alpha + \beta$ pada proses pendinginan pada titik eutektoid.

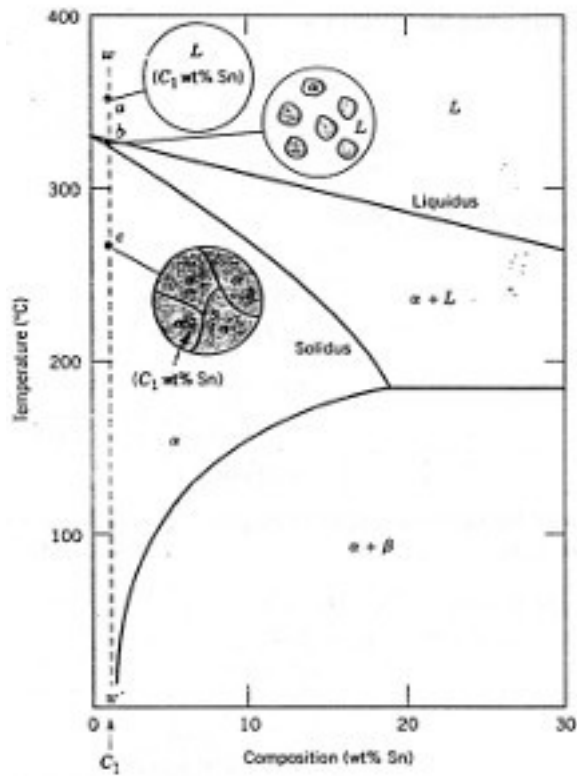


FIGURE 9.9 Schematic representations of the equilibrium microstructures for a lead-tin alloy of composition C_1 as it is cooled from the liquid-phase region.

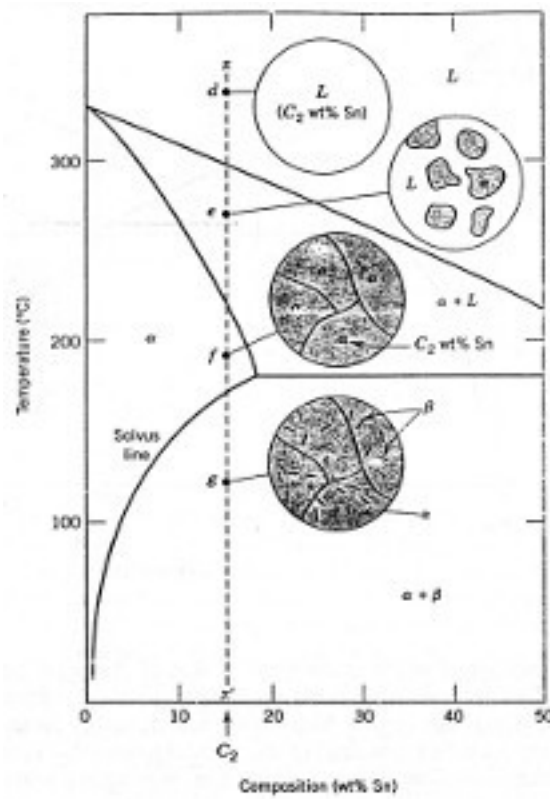
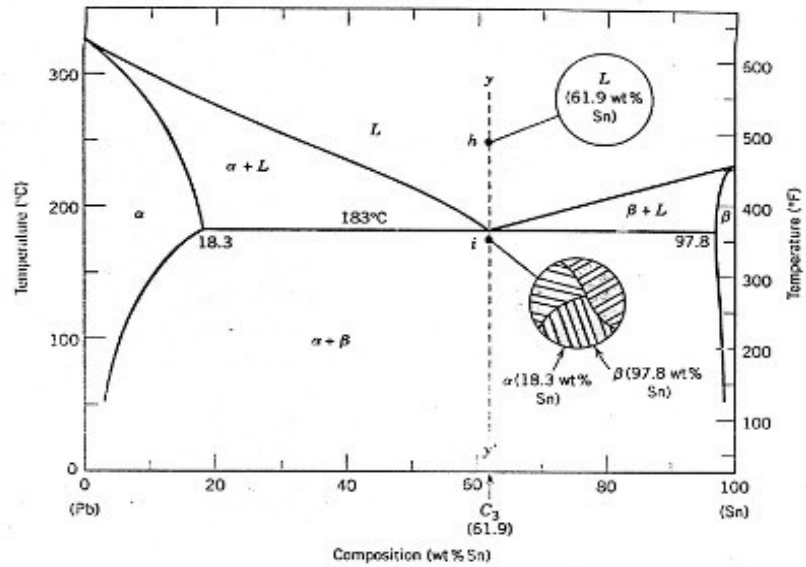


FIGURE 9.10 Schematic representations of the equilibrium microstructures for a lead-tin alloy of composition C_2 as it is cooled from the liquid-phase region.

FIGURE 9.11
Schematic representations of the equilibrium microstructures for a lead-tin alloy of eutectic composition C_3 above and below the eutectic temperature.



Pada pendinginan melewati temperatur eutectic (Gb. 9.11), struktur mikro yang terbentuk adalah struktur yang berbentuk lapisan atau lamellae (lapisan), struktur seperti ini disebut struktur eutectic.

Pada pendinginan pada komposisi antara α dan titik eutectic akan terbentuk eutectic α , primary α , β . (gb. 9.14)

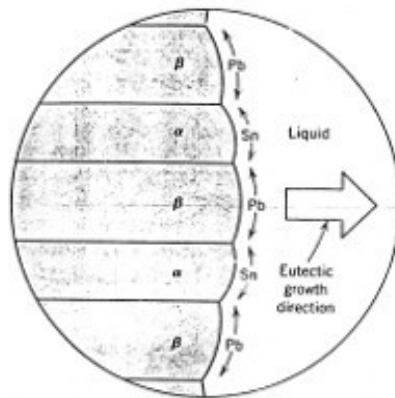


FIGURE 9.13 Schematic representation of the formation of the eutectic structure for the lead-tin system. Directions of diffusion of tin and lead atoms indicated by colored and black arrows, respectively.

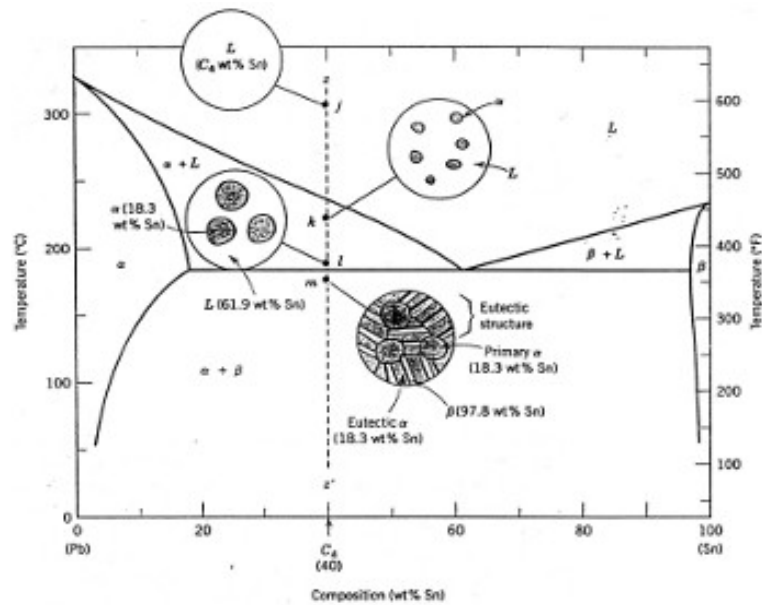


FIGURE 9.14 Schematic representations of the equilibrium microstructures for a lead-tin alloy of composition C_2 as it is cooled from the liquid-phase region.

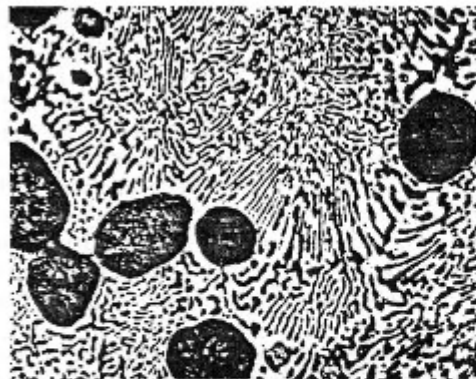


FIGURE 9.15 Photomicrograph showing the microstructure of a lead-tin alloy of composition 50 wt% Sn-50 wt% Pb. This microstructure is composed of a primary lead-rich α phase (large dark regions) within a lamellar eutectic structure consisting of a tin-rich β phase (light layers) and a lead-rich α phase (dark layers). 400 \times . (Reproduced with permission from *Metals Handbook*, Vol. 9, 9th edition, *Metallography and Microstructures*, American Society for Metals, Materials Park, OH, 1985.)

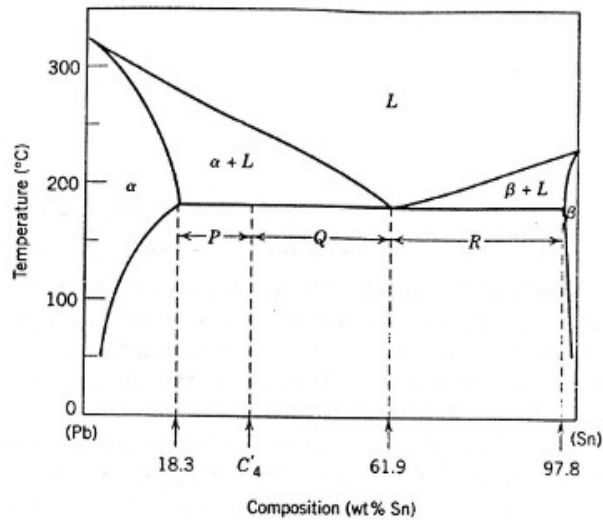
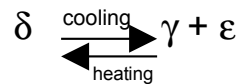


FIGURE 9.16 The lead-tin phase diagram used in computations for relative amounts of primary α and eutectic microconstituents for an alloy of composition C_4 .

REAKSI EUTECTOID DAN PERITECTIC

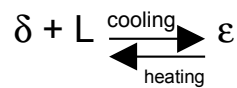
Reaksi eutectoid yaitu reaksi dimana terjadi perubahan fase padat menjadi 2 fase padat lainnya pada proses pendinginan atau sebaliknya.

Contoh : pd $T = 558\text{ }^{\circ}\text{C}$ 75 Wt% Zn – 25 Wt% Cu.



Reaksi peritectic yaitu pada proses pemanasan, satu fase padat berubah menjadi 1 fase padat dan 1 fase cair.

Contoh : pd $T = 598\text{ }^{\circ}\text{C}$ 78,6 Wt% Zn – 21,4 Wt% Cu.



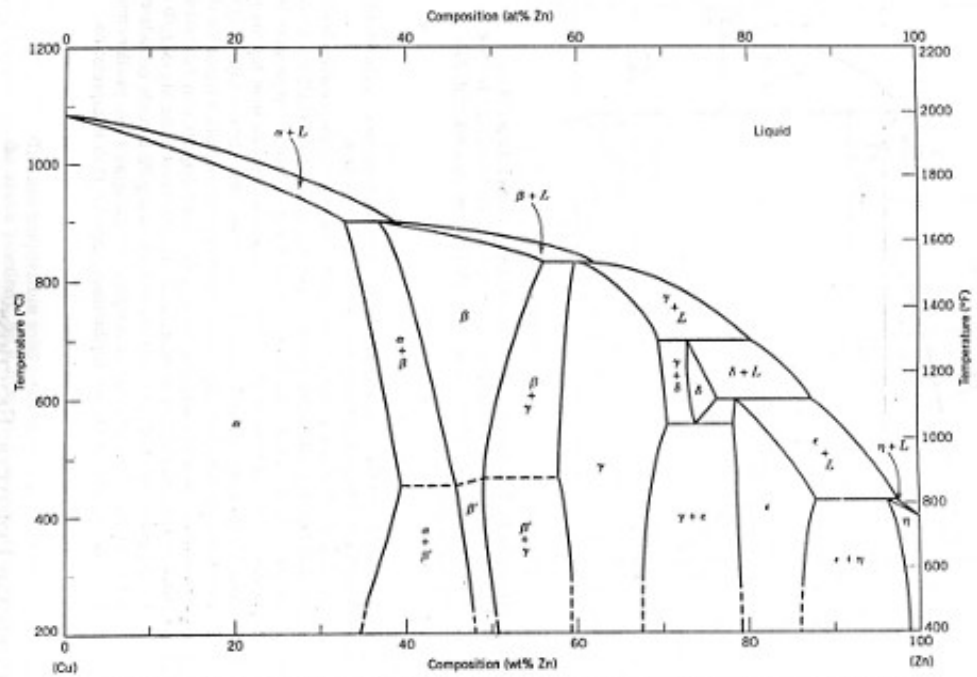


FIGURE 9.17 The copper-zinc phase diagram. (Adapted from *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd edition, Vol. 2, T. B. Massalski, Editor-in-Chief, 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

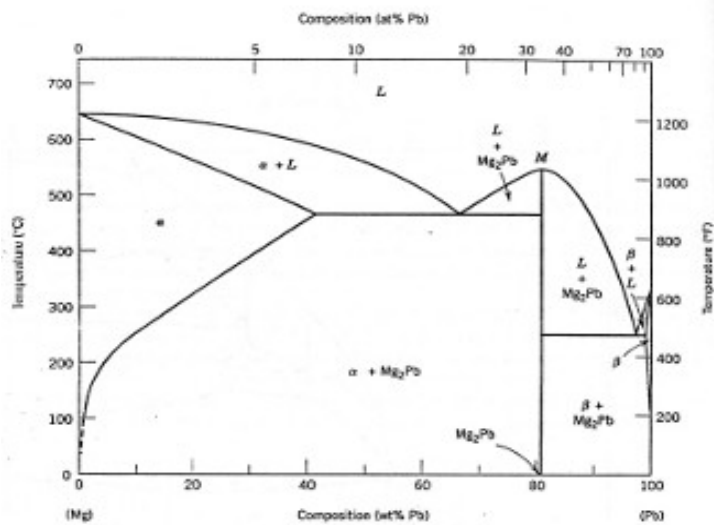


FIGURE 9.18 The magnesium-lead phase diagram. (Adapted from *Phase Diagrams of Binary Magnesium Alloys*, A. A. Nayeb-Hashemi and J. B. Clark, Editors, 1988. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

TRANSFORMASI FASE KONGRUEN/SEBANGUN

Transformasi fase congruent adalah transformasi fase dimana tidak terjadi perubahan komposisi

Lawannya transformasi fase incongruent → terjadi perubahan komposisi.

Contoh transformasi fase congruent Titik M pada Gb. 9.18.

HUKUM FASE GIBBS

Konstruksi diagram fase dan kondisi kesetimbangan fase mengikuti hukum termodinamika.

j.w. gibbs memberikan formula yang disebut hukum fase gibbs :

$$P + F = C + N$$

P = jumlah fase

F = derajat kebebasan

C = jumlah komponen sistem

N = jumlah variabel non – komposisi.

Misal : sistem Cu – Ag (Gb. 9.6)

Tekanan konstan

$N = 1$ (hanya temperatur variabel non komposisi)

$$P + F = 2 + 1$$

$$= 3$$

$$F = 3 - P$$

Jika fase = fase tunggal (α atau β atau L)

$$P = 1$$

$$F = 3 - 1 = 2$$

$$F = 2$$

Artinya bahwa menerangkan karakteristik paduan mempunyai fase tunggal, kita harus menentukan 2 parameter yaitu komposisi dan temperatur.

SISTEM BESI KARBON

Besi dengan campuran karbon adalah bahan yang paling banyak digunakan.

DIAGRAM FASA BESI – BESI CARBIDA (Fe – Fe₃C)

Diagram fasa besi – besi carbida bisa dilihat pada gambar 9.22.

Diagram fasa besi – karbida dibatasi sampai komposisi karbon 6,7 %wt. Diatas 6,7 wt% bahan digolongkan kedalam bahan grafit.

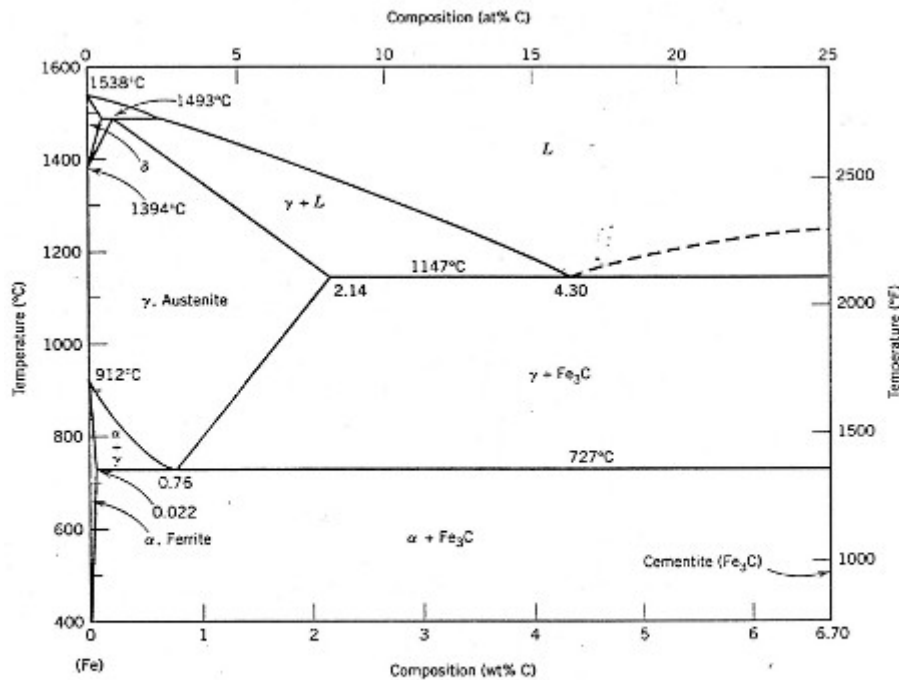


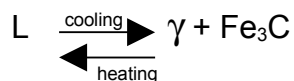
FIGURE 9.22 The iron-iron carbide phase diagram. (Adapted from *Binary Alloy Phase Diagrams*, 2nd edition, Vol. 1, T. B. Massalski, Editor-in-Chief, 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)

- besi murni : pada temperatur ruang disebut ferit atau besi α yang mempunyai struktur kristal BCC.
Ferit akan berubah menjadi austenit atau besi γ pada temperatur 912 °C(1674 °C) dengan struktur kristal FCC. Pada temperatur 1538 °C (2800 °F) austenite akan berubah menjadi besi ferit δ dan struktur kristal BCC.
- baja dan besi tuang adalah besi yang mempunyai kadar karbon kecil dari 6,7 wt%. Pada 6,7wt% terdapat kandungan Fe₃C sebesar 100 %wt, sehingga kandungan karbon 6,7 wt% disebut juga mempunyai kandungan 100 wt% Fe₃C (cementite).
- besi α (ferit) : komposisi maksimum C adalah 0,022 wt% pada 727 °C (1341 °F).
sifat bahan :
 - lunak
 - bisa dibuat magnet pada temperatur dibawah 768 °C

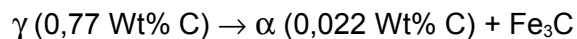
- kerapatan : 9,88 gr/cm³.

- austenite (besi γ) : maksimum karbon 2,11wt% pada 1148^oC. Struktur kristal FCC. Austenite bersifat non magnet.
- besi δ (ferit δ) : mempunyai bentuk yang sama dengan ferit α hanya temperatur yang berbeda yaitu antara 1394 ^oC sampai 1538 ^oC.
- cementite (Fe₃C) : terbentuk ketika batas kelarutan karbon pada besi α terlewati pada temperatur dibawah 727 ^oC. Fe₃C juga terbentuk dengan fasa γ pada temperatur 727 s/d 1148 ^oC. Sifat mekanik cementite adalah keras dan rapuh. Kekuatan beberapa baja bisa ditingkatkan dengan kandungan cementite.

- Reaksi eutectic terjadi pada 4,3 wt% C dan temperatur 1148 ^oC



- Reaksi eutectoid terjadi pada 0,77 wt% C dan temperatur 727 ^oC :



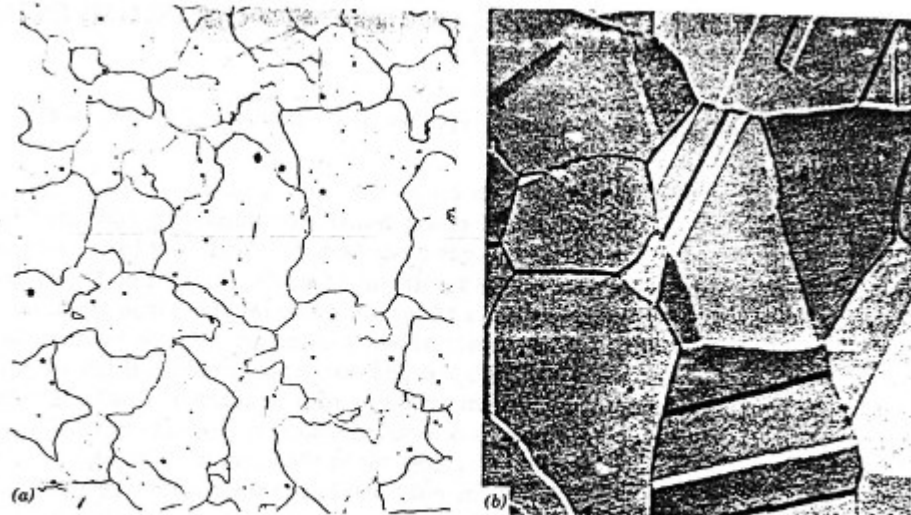


FIGURE 9.23 Photomicrographs of (a) α ferrite (90 \times) and (b) austenite (325 \times).
(Copyright 1971 by United States Steel Corporation.)

BESI PADUAN (FERROUS ALLOY) :

Adalah dimana besi sebagai komponen utama dan karbon beserta komponen – komponen lainnya sebagai bahan paduan.

Berdasarkan kandungan paduan, besi paduan dibagi atas :

- Besi (iron)
 - Baja (steel)
 - Besi tuang (cast iron).
- Besi murni : kandungan karbon kurang dari 0,008 wt%, dan strukturnya ferit pada temperatur ruang.
 - Baja : kandungan karbon antara 0,008 – 0,11 wt% C struktur kristal : $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$.
 - Besi tuang : kandungan karbon antara 1,11 – 6,7 wt% C. Besi tuang komersial biasanya kandungan karbon < 4,5wt% C.

Transformasi fasa terjadi dari daerah γ ke daerah $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$. Pada titik eutektoid (gb. 9.24) austenite dengan komposisi 0,77 wt% C akan berubah menjadi ferit (0,022 wt% C) dan Fe_3C (6,7 wt% C). Struktur $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ disebut juga pearlite (gb. 9.25).

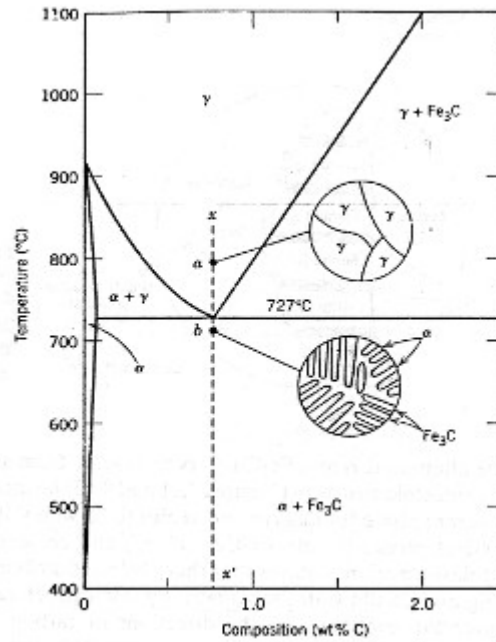


FIGURE 9.24 Schematic representations of the microstructures for an iron-carbon alloy of eutectoid composition (0.76 wt% C) above and below the eutectoid temperature.



FIGURE 9.25 Photomicrograph of a eutectoid steel showing the pearlite microstructure consisting of alternating layers of α ferrite (the light phase) and Fe_3C (thin layers most of which appear dark). 500 \times . (Reproduced with permission from *Metals Handbook*, Vol. 9, 9th edition, *Metallography and Microstructures*, American Society for Metals, Materials Park, OH, 1985.)

PADUAN HYPOEUTECTOID

Pembentukan fasa $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ dengan komposisi dibawah titik eutectoid disebut paduan hypoeutectoid. Proses pembentukannya bisa dilihat pada gambar 9.27. Struktur kristal yang terbentuk mempunyai fasa pearlite dan proeutectoid α .

Proeutectoid ferit (α) adalah ferit yang terbentuk sebelum terbentuknya pearlite.

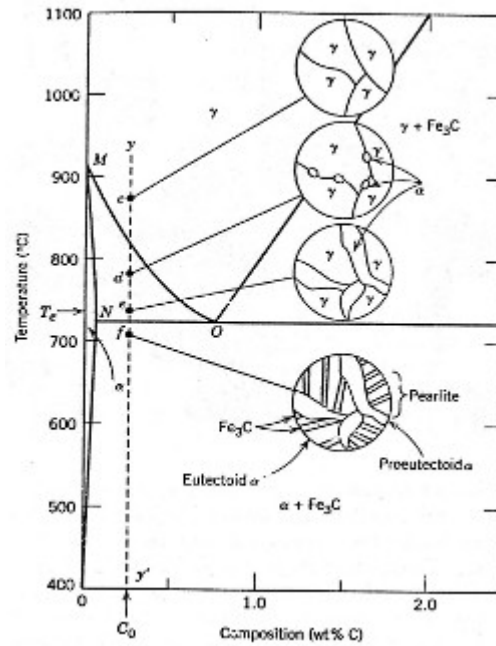


FIGURE 9.27 Schematic representations of the microstructures for an iron-carbon alloy of hypoeutectoid composition C_0 (containing less than 0.76 wt% C) as it is cooled from within the austenite phase region to below the eutectoid temperature.

Pada pembentukan hypoeutectoid :
(lihat Gb. 9.29),

$$W_p = \frac{T}{T + V}$$

$$= \frac{C_0' - 0,022}{0,76 - 0,022} = \frac{C_0' - 0,022}{0,74}$$

W_p = fraksi pearlite.

$$W_{\alpha'} = \frac{V}{T + V}$$

$$= \frac{0,76 - C_0'}{0,76 - 0,022} = \frac{0,76 - C_0'}{0,74}$$

$W_{\alpha'}$ = fraksi ferit proeutectoid.

PADUAN HYPEREUTCTOID

Pembentukan fasa $\alpha + Fe_3C$ dengan komposisi diatas titik eutectoid disebut paduan hypereutectoid. (gb. 9.30).

$$W_p = \frac{X}{V + X} = \frac{6,70 - C_l'}{6,70 - 0,76} = \frac{6,70 - C_l'}{5,94}$$

$$W_{Fe_3C} = \frac{V}{V + X} = \frac{C_l' - 0,76}{6,70 - 0,76} = \frac{C_l' - 0,76}{5,94}$$

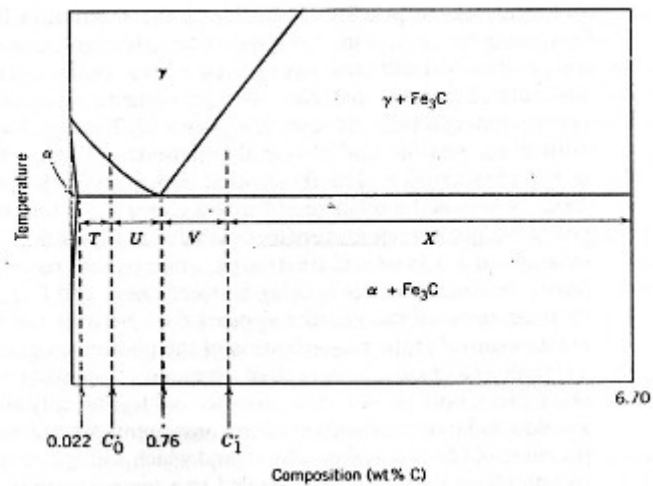
W_{Fe_3C} = fraksi sementit proeutectoid

Proeutectoid sementit adalah : sementit yang terbentuk sebelum terbentuknya pearlite.

FIGURE 9.28
 Photomicrograph of
 a 0.38 wt% C steel
 having a micro-
 structure consisting of
 pearlite and
 proeutectoid ferrite.
 635X.
 (Photomicrograph
 courtesy of Republic
 Steel Corporation.)



FIGURE 9.29
 A portion of the
 Fe-Fe₃C phase
 diagram used in
 computations for
 relative amounts of
 proeutectoid and
 pearlite
 microconstituents for
 hypoeutectoid (C₀)
 and hypereutectoid
 (C₁) compositions.



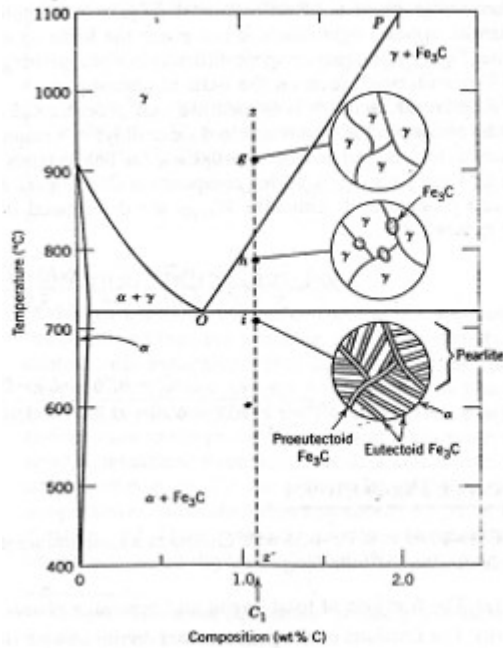


FIGURE 9.30 Schematic representations of the microstructures for an iron-carbon alloy of hypereutectoid composition C_1 (containing between 0.76 and 2.14 wt% C), as it is cooled from within the austenite phase region to below the eutectoid temperature.



FIGURE 9.31 Photomicrograph of a 1.4 wt% C steel having a microstructure consisting of a white proeutectoid cementite network surrounding the pearlite colonies. 1000 \times . (Copyright 1971 by United States Steel Corporation.)

Contoh Soal

Untuk paduan 99,65 wt% Fe – 0,35 wt% C pada temperatur sedikit di bawah titik eutektoid, carilah:

- fraksi total fase ferit dan sementit.
- fraksi ferit proeutektoid dan pearlite proeutektoid.
- fraksi ferit eutektoid.

Jawab

- fraksi total fase ferit dan sementit

$$C_0' = 0,35 \text{ wt\% C}$$

$$W_{\alpha} = \frac{6,70 - 0,35}{6,70 - 0,022} = 0,95$$

dan

$$W_{Fe_3C} = \frac{0,35 - 0,022}{6,70 - 0,022} = 0,05$$

b. *fraksi ferit proeutectoid dan pearlite proeutectoid*

$$W_p = \frac{0,35 - 0,022}{0,76 - 0,022} = 0,44$$

dan

$$W_{\alpha'} = \frac{0,76 - 0,35}{0,76 - 0,022} = 0,56$$

c. *fraksi ferit eutectoid*

Semua ferit, baik sebagai proeutektoid ataupun sebagai eutektoid (dalam pearlit). Maka jumlah kedua fraksi ferit ini sama dengan jumlah total ferit, sehingga:

$$W_{\alpha'} + W_{al} = W_{\alpha}$$

dimana W_{al} adalah fraksi total paduan yang berupa ferit eutektoid. Maka:

$$W_{al} = W_{\alpha} - W_{\alpha'} = 0,95 - 0,56 = 0,39$$

PENGARUH ELEMEN PADUAN LAINNYA .

Elemen paduan lain seperti Cr, Ni, Ti, dll, memberikan pengaruh yang besar pada diagram fasa Fe – C. Gb. 9.20 memperlihatkan pengaruh paduan ini terhadap posisi batas perubahan fasa. Gb. 9.30 memperlihatkan perubahan komposisi eutektoid karena logam paduan.

Soal-soal

1. Sebutkanlah variabel-variabel yang menentukan struktur mikro sebuah paduan.
2. Kondisi termodinamik apa yang harus dipenuhi supaya terjadi kondisi kesetimbangan.
3. Sebutkan fase-fase yang dijumpai dari komposisi fase paduan berikut:
 - a. 90 wt% Zn – 10 wt% Cu pada 400^o C.
 - b. 75 wt% Sn – 25 wt% Pb pada 175^o C.
 - c. 55 wt% Ag – 45 wt% Cu pada 900^o C.
 - d. 30 wt% Pb – 70 wt% Mg pada 425^o C.
 - e. 2,12 kg Zn dan 1,88 kg Cu pada 500^o C.
 - f. 8,2 mol Ni dan 4,3 mol Cu 1250^o C.
4. Untuk paduan dengan komposisi 74 wt% Zn – 26 wt% Cu, sebutkanlah fase-fase yang dijumpai pada temperatur-temperatur berikut: 800^o C, 750^o C, 680^o C, 600^o C, dan 500^o C.
5.
 - a. Jelaskan dengan ringkas fenomena dari pembentukan *cored structured* dan apa penyebab terjadinya.
 - b. Sebutkanlah satu konsekuensi yang tidak diinginkan dari pembentukan struktur inti (*cored structured*).
6. Misalkan 3,5 kg austenite mengandung 0,95 wt% C, didinginkan ke suhu di bawah 727^o C.
 - a. Apakah fase dari proeutektoid?
 - b. Berapa kg berat ferit total dan sementit?
 - c. Berapa kg berat fase pearlite dan proeutektoid?
 - d. Buatlah sketsa struktur mikro yang terjadi, dan beri nama.

BAB VI

TRANSFORMASI FASE PADA LOGAM

Sebagian besar transformasi bahan padat tidak terjadi terus menerus sebab ada hambatan yang menghalangi jalannya reaksi dan bergantung terhadap waktu. Contoh : umumnya transformasi membentuk minimal satu fase baru yang mempunyai komposisi atau struktur kristal yang berbeda dengan bahan induk (bahan sebelum terjadinya transformasi). Pengaturan susunan atom terjadi karena proses difusi.

Secara struktur mikro, proses pertama yang terjadi pada transformasi fasa adalah *nukleasi* yaitu pembentukan partikel sangat kecil atau nuklei dari fase baru. Nuklei ini akhirnya tumbuh membesar membentuk fasa baru. Pertumbuhan fase ini akan selesai jika pertumbuhan tersebut berjalan sampai tercapai fraksi kesetimbangan.

Laju transformasi yang merupakan fungsi waktu (sering disebut kinetika transformasi) adalah hal yang penting dalam perlakuan panas bahan. Pada penelitian kinetik akan didapat kurva S yang di plot sebagai fungsi fraksi bahan yang bertransformasi vs waktu (logaritmik) .

Fraksi transformasi , y di rumuskan:

$$Y = 1 - \exp(-kt^n)$$

t = waktu

k, n = konstanta yang tidak tergantung waktu.

Persamaan ini disebut juga persamaan AVRAMI

Laju transformasi , r diambil pada waktu $\frac{1}{2}$ dari proses berakhir :

$$r = \frac{1}{t_{0,5}}$$

$t_{0,5}$ = waktu $\frac{1}{2}$ proses

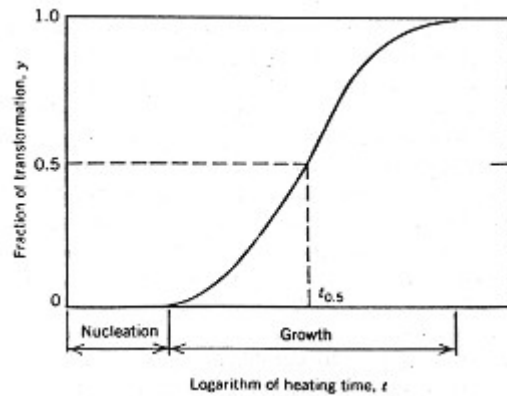


FIGURE 10.1 Plot of fraction reacted versus the logarithm of time typical of many solid-state transformations in which temperature is held constant.

Efek temperatur terhadap kinetik bisa dilihat pada gambar 10 ,2.

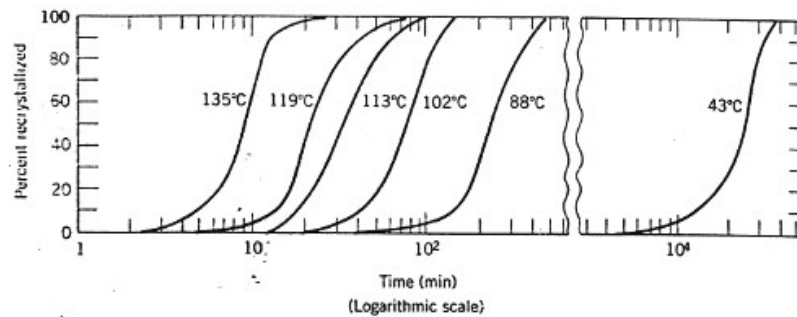


FIGURE 10.2 Percent recrystallization as a function of time and at constant temperature for pure copper. (Reprinted with permission from *Metallurgical Transactions*, Vol. 188, 1950, a publication of The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, Pennsylvania. Adapted from B. F. Decker and D. Harker, "Recrystallization in Rolled Copper," *Trans. AIME*, 188, 1950, p. 888.)

Laju transformasi , r terhadap jangkauan temperatur dirumuskan :

$$r = Ae^{-Q/RT}$$

R = konstanta gas

T = temperatur mutlak

A = konstanta , tidak tergantung waktu.

Q = Energi aktivasi untuk reaksi tertentu.

TRANFORMASI MULTI FASA

Transformasi fasa bisa dilakukan dengan memvariasikan temperatur , komposisi dan tekanan. Perubahan panas yang terjadi bisa dilihat pada diagram fasa. Namun

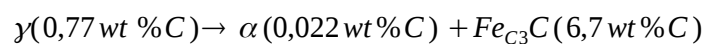
kecepatan perubahan temperatur berpengaruh terhadap perkembangan pembentukan struktur mikro. Hal ini tidak bisa diamati pada diagram fasa komposisi vs temperatur.

Posisi ketimbangan yang dicapai pada proses pemanasan atau pendinginan sesuai dengan diagram fasa bisa dicapai dengan laju yang sangat pelan sekali, sehingga hal ini tidak praktis. Cara lain yang dipakai adalah *supercooling* yaitu transformasi pada proses pendinginan dilakukan pada temperatur yang lebih rendah, atau *superheating* yaitu transformasi pada proses pemanasan dilakukan pada temperatur yang lebih tinggi.

PERUBAHAN SIFAT DAN STRUKTUR MIKRO PADA PADUAN BESI – KARBON

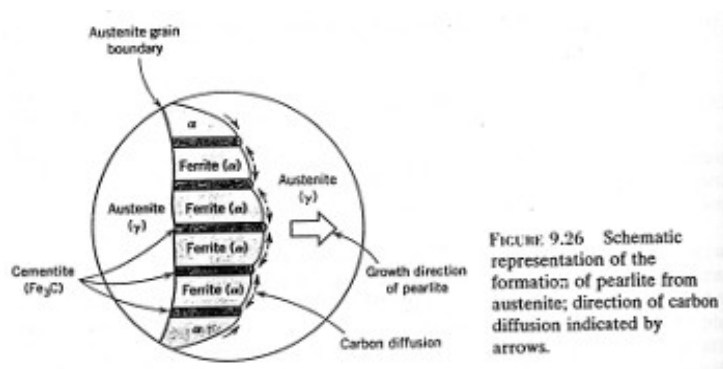
DIAGRAM TRANSFORMASI ISOTHERMAL

*** PEARLITE ***



Pada reaksi eutektoid, austenite dengan kandungan karbon sedang akan berubah menjadi ferit dengan kadar karbon kecil dan sementit dengan kadar karbon tinggi. Pada saat pembentukan pearlite, gerakan atom C bergerak dari ferit ke sementit (gb.9.26).

Pengaruh temperatur terhadap waktu pembentukan pearlite dilukiskan pada grafik 10.3.



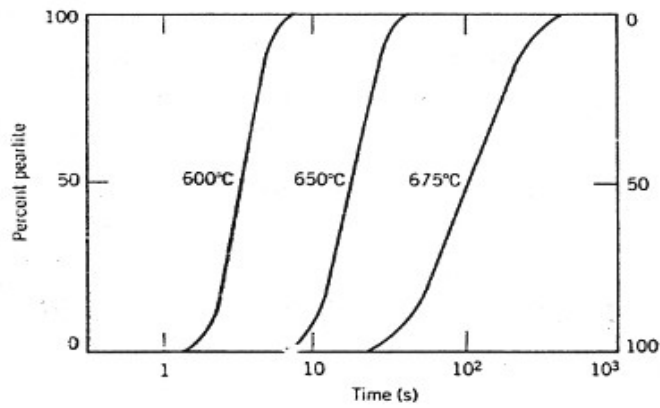


FIGURE 10.3 For an iron-carbon alloy of eutectoid composition (0.76 wt% C), isothermal fraction reacted versus the logarithm of time for the austenite-to-pearlite transformation.

Cara yang lebih menyenangkan dilukiskan pada gambar 10.4 dengan sumbu vertikal adalah temperatur dan sumbu horizontal adalah waktu. 2 kurva masing-masing adalah kurva awal yaitu mulai terjadinya transformasi dan kurva akhir yaitu berakhirnya transformasi. Dari transformasi tersebut, temperatur eutectoid adalah garis horizontal pada temperatur 727 °C. Transformasi terjadi dibawah garis eutectoid atau supercooling. Transformasi terjadi pada temperatur tetap atau isothermal. Kurva 10.4 disebut juga kurva TTT (time temperature transformation).

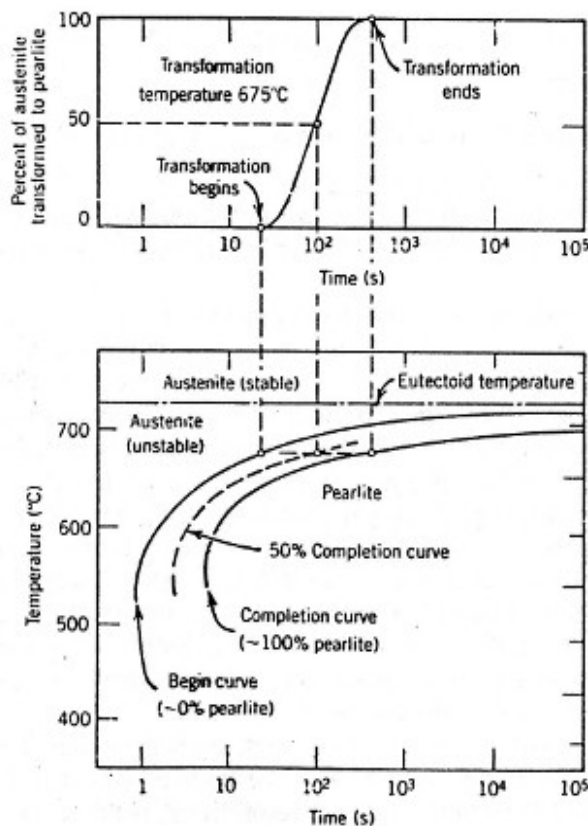
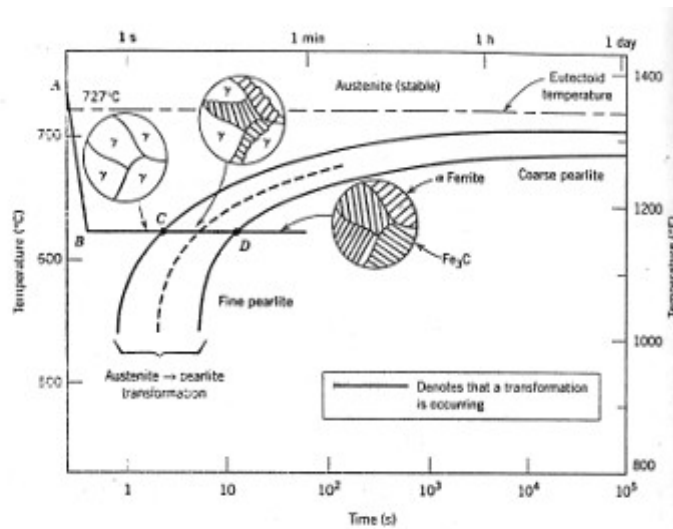


FIGURE 10.4 Demonstration of how an isothermal transformation diagram (bottom) is generated from percent transformation-versus-logarithm of time measurements (top). (Adapted from H. Boyer, Editor, *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 369.)

Gb. 10.5 memperlihatkan transformasi fasa austenit ke pearlit. Austenit didinginkan secara cepat dari A ke B, kemudian temperatur ditahan pada proses BCD .

Jika temperatur ditahan pada sedikit dibawah temperatur eutektoid maka akan terbentuk lapisan ferit sementit yang tebal dan disebut juga “ coarse pearlite” (pearlite kasar), kebalikannya jika temperatur transformasinya lebih rendah disekitar 540 °C maka lapisan-lapisan perlite yang terbentuk akan tipis dan disebut juga “fine pearlite” (pearlite halus).

FIGURE 10.5
Isothermal transformation diagram for a eutectoid iron-carbon alloy, with superimposed isothermal heat treatment curve (ABCD). Microstructures before, during, and after the austenite-to-pearlite transformation are shown. (Adapted from H. Boyer, Editor, *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 28.)



Jika pada reaksi eutektoid terbentuk fasa proeutectoid bersama-sama pearlite maka pada kurva TTT perlu ditambahkan kurva lain yang menggambarkan transformasi proeutectoid. Untuk besi dengan kandungan 1,13 wt % C grafik TTT diberikan pada gb. 10.7.

BAINITE

Bainite adalah struktur ferit dan sementit yang berbentuk lidi atau plat tergantung temperatur transformasi. Struktur mikro bainit adalah sangat halus sehingga resolusinya hanya bisa dilihat dengan mikroskop elektron . Foto mikroskop untuk bainit bisa dilihat pada gambar 10.8.

Temperatur pembentukan bainit terjadi dibawah temperatur pembentukan pearlite yaitu diantara temperatur 215 °C-540 °C. Kurva TTT untuk bainit bisa dilihat pada gb. 10.9. Laju pembentukan bainit akan naik dengan naiknya temperatur.

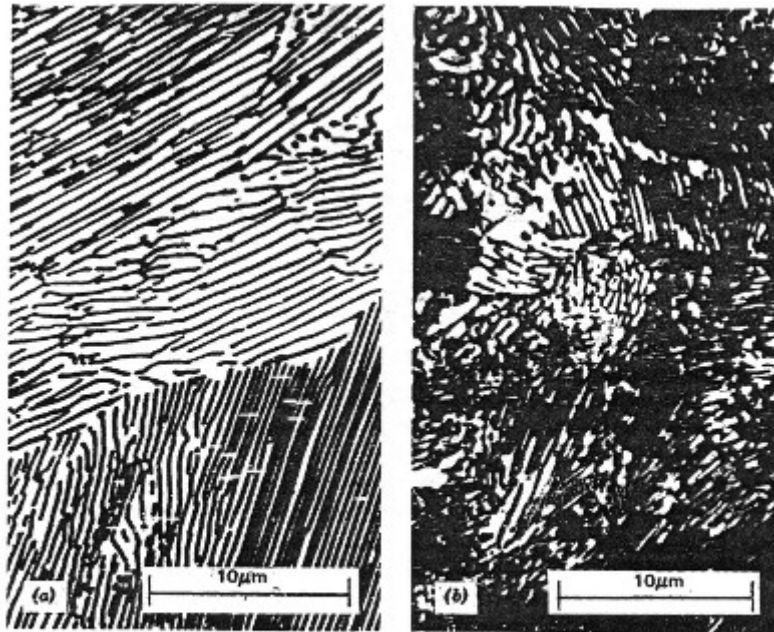


FIGURE 10.6 Photomicrographs of (a) coarse pearlite and (b) fine pearlite. 3000 \times . (From K. M. Ralls, et al., *An Introduction to Materials Science and Engineering*, p. 361. Copyright © 1976 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

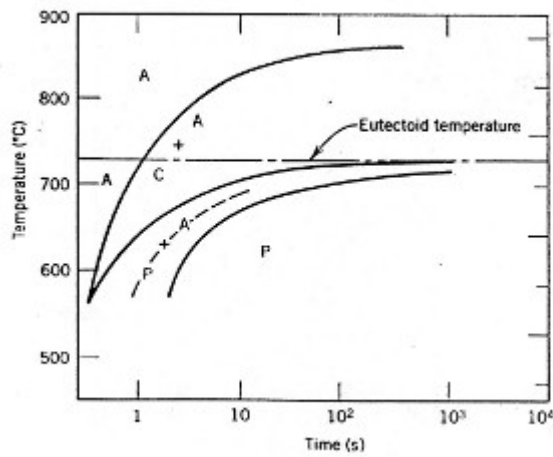


FIGURE 10.7 Isothermal transformation diagram for a 1.13 wt% C iron-carbon alloy: A, austenite; C, proeutectoid cementite; P, pearlite. (Adapted from H. Boyer, Editor, *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 33.)

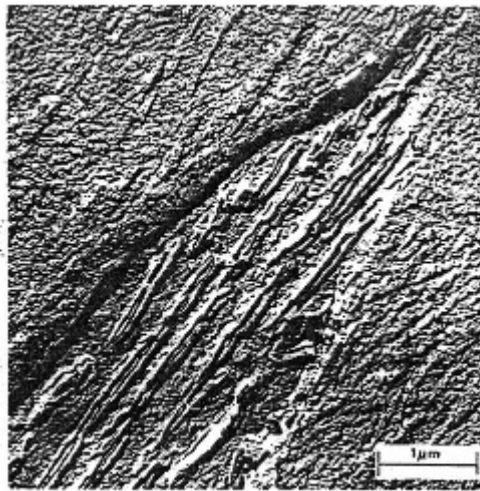


FIGURE 10.8 Replica transmission electron micrograph showing the structure of bainite. A needle of bainite passes from lower left to upper right-hand corners, which consists of elongated particles of Fe_3C within a ferrite matrix. The phase surrounding the bainite needle is martensite. (Reproduced with permission from *Metals Handbook*, Vol. 8, 8th edition, *Metallurgy, Structures and Phase Diagrams*, American Society for Metals, Materials Park, OH, 1973.)

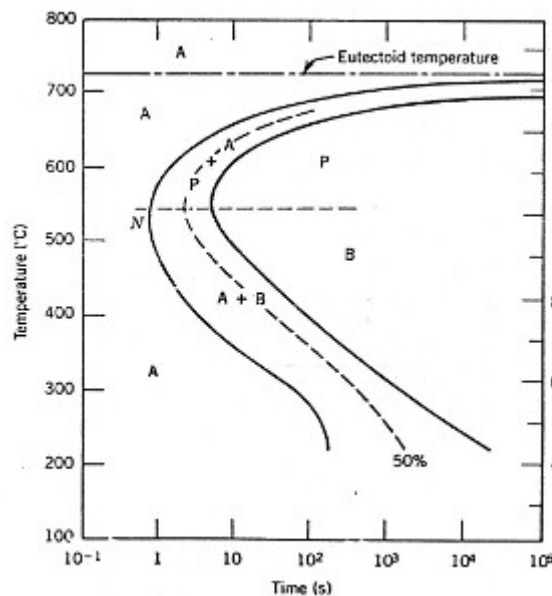


FIGURE 10.9 Isothermal transformation diagram for an iron-carbon alloy of eutectoid composition, including austenite-to-pearlite (A-P) and austenite-to-bainite (A-B) transformations. (Adapted from H. Boyer, Editor, *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 28.)

SPHEROIDITE

Jika paduan baja mempunyai struktur mikro pearlit atau bainit dipanaskan pada temperatur dibawah temperatur eutectiod dan ditahan untuk waktu yang lama katakanlah $t=700\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 18 s/d 24 jam, maka akan terbentuk struktur mikro yang lain dan disebut **spheroidite**.

Struktur spheroidite mempunyai bentuk dimana fasa Fe_3C muncul dalam bentuk lingkaran / bulat pada bahan ferit. Transformasi ini terjadi karena difusi atom karbon

tanpa perubahan komposisi ferit dan sementit. Foto mikrograph bisa dilihat pada gb. 10.10.

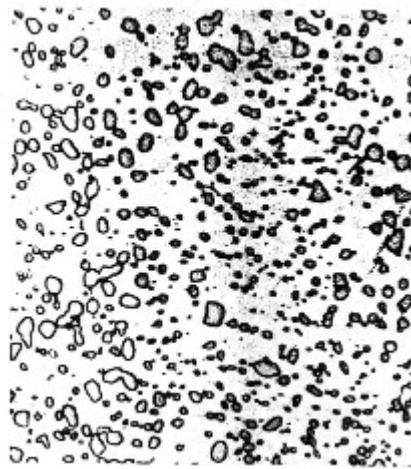


FIGURE 10.10 Photomicrograph of a steel having a spheroidite microstructure. The small particles are cementite; the continuous phase is α ferrite. 1000 \times . (Copyright 1971 by United States Steel Corporation.)

MARTENSITE

Fasa yang lain dari yang sudah disebutkan diatas adalah fasa martensit. Martensit terbentuk apabila besi austenit didinginkan dengan sangat cepat ke temperatur rendah, sekitar temperatur ambien. Martensit adalah fasa tunggal yang tidak seimbang yang terjadi karena transformasi tanpa difusi dari austenit. Pada transformasi membentuk martensite, hanya terjadi sedikit perubahan posisi atom relatif terhadap yang lainnya.

Struktur FCC austenit akan berubah menjadi struktur BCT (body centered tetragonal) martensit (gb 10.11), pada transformasi ini. Karena transformasi martensit tidak melewati proses difusi, maka ia terjadi seketika sehingga laju transformasi martensit adalah tidak bergantung waktu. Butir martensit berbentuk seperti lidi/jarum atau plat (gb,10.12). Pada struktur martensit masih didapati struktur austenit yang tidak sempat bertransformasi.

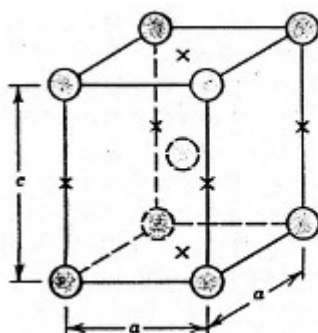


FIGURE 10.11 The body-centered tetragonal unit cell for martensitic steel showing iron atoms (circles) and sites that may be occupied by carbon atoms (crosses). For this tetragonal unit cell, $c > a$.



FIGURE 10.12 Photomicrograph showing the martensitic microstructure. The needle-shaped grains are the martensite phase, and the white regions are austenite that failed to transform during the rapid quench. 1220X. (Photomicrograph courtesy of United States Steel Corporation.)

Garis pembentukan martensite dapat dilihat pada diagram TTT pada gb.10.13

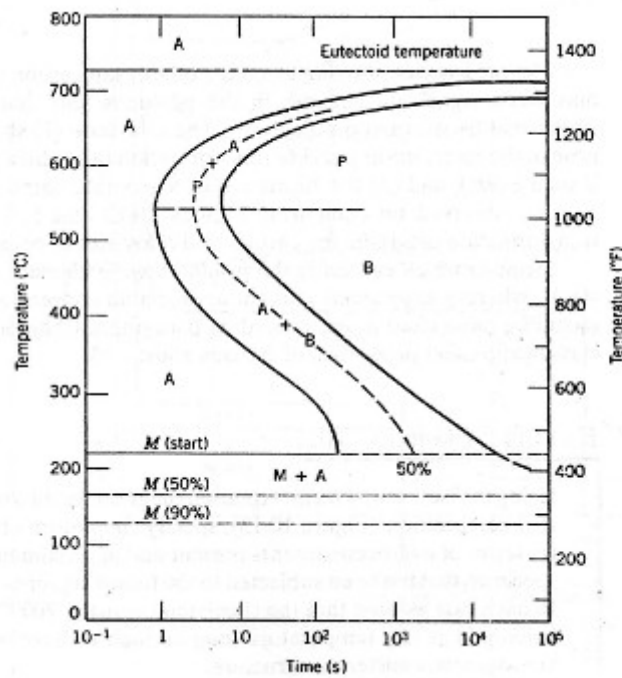


FIGURE 10.13 The complete isothermal transformation diagram for an iron-carbon alloy of eutectoid composition: A, austenite; B, bainite; M, martensite; P, pearlite.

Contoh soal

Dengan menggunakan diagram transformasi untuk paduan besi-karbon komposisi eutektik (gambar 10.13), tentukanlah kondisi alami struktur mikro akhir (dalam kondisi mikro yang ada dan persentase perkiraan) dari spesimen yang mengalami perlakuan berikut: Dalam setiap kasus diasumsikan bahwa perlakuan spesimen dimulai pada temperatur 760°C dan ditahan cukup lama pada temperatur ini untuk mendapatkan struktur austenit yang homogen dan sempurna.

- a. Dengan cepat didinginkan hingga 350°C , ditahan 10^4 detik, dan didinginkan dengan cepat ke temperatur ruang.
- b. Dengan cepat didinginkan hingga 250°C , ditahan 100 detik, dan didinginkan dengan cepat ke temperatur ruang.
- c. Dengan cepat didinginkan hingga 650°C , ditahan 20 detik, didinginkan dengan cepat ke temperatur 400°C , ditahan 10^3 detik, dan didinginkan dengan cepat ke temperatur ruang.

Jawab

Jalur waktu-temperatur untuk masing-masing kasus ditunjukkan oleh gambar 10.15. Pada setiap kasus, pendinginan awal cukup cepat untuk mencegah transformasi terjadi.

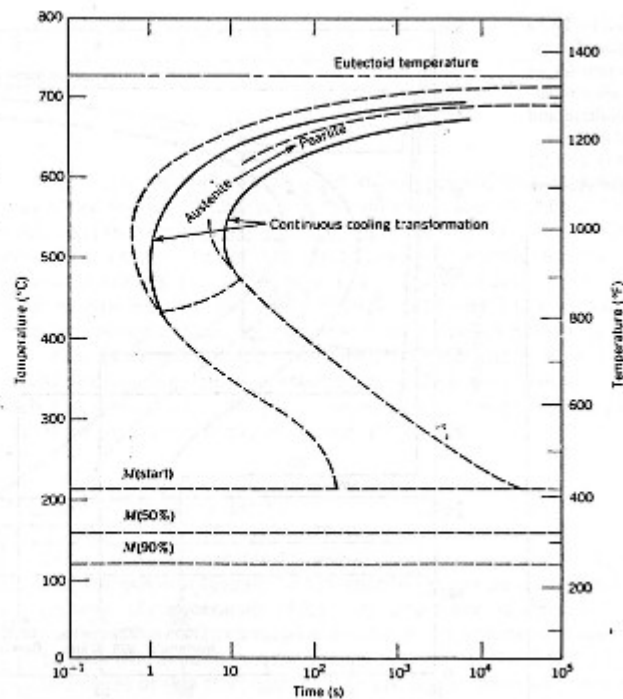
- a. Pada 350°C austenit secara isothermal akan bertransformasi ke bainit; reaksi ini dimulai setelah kira-kira 10 detik dan berlangsung sampai waktu 500 detik. Karena itu setelah 10^4 detik 100% spesimen adalah bainit dan tidak terjadi transformasi yang lain, walaupun pendinginan akhir melewati daerah martensit pada diagram.
- b. Dalam hal ini, perlu waktu 150 detik pada 250°C untuk mulai bertransformasi menjadi bainit. Sehingga untuk waktu 100 detik spesimen masih dalam keadaan 100% austenit. Ketika spesimen didinginkan melewati daerah martensite, dimulai pada 215°C , secara progresif austenite berubah menjadi martensite. Reaksi ini selesai ketika temperatur ruang tercapai. Sehingga struktur mikro akhirnya adalah 100% martensite.
- c. Untuk garis isothermal pada 650°C , pearlite mulai terbentuk setelah kira-kira 7 detik; ketika waktu penahanan sampai 20 detik, baru kira-kira 50% dari spesimen yang berubah menjadi pearlite. Pendinginan cepat ke 400°C ditunjukkan oleh garis vertikal; selama pendinginan ini, sangat sedikit, jika ada, austenite sisa akan bertransformasi baik ke pearlite atau bainit, walaupun garis pendinginan melewati daerah pearlite dan bainit pada diagram. Pada 400°C , kita mulai waktunya dari nol kembali, sehingga dengan waktu 10^3 detik, semua 50% austenite tersisa akan berubah menjadi bainit. Pada pendinginan secara cepat ke temperatur ruang, tidak lagi terjadi perubahan fasa karena tidak ada lagi austenit tersisa. Sehingga struktur mikro spesimen pada temperatur ruang adalah 50% pearlite dan 50% bainit.

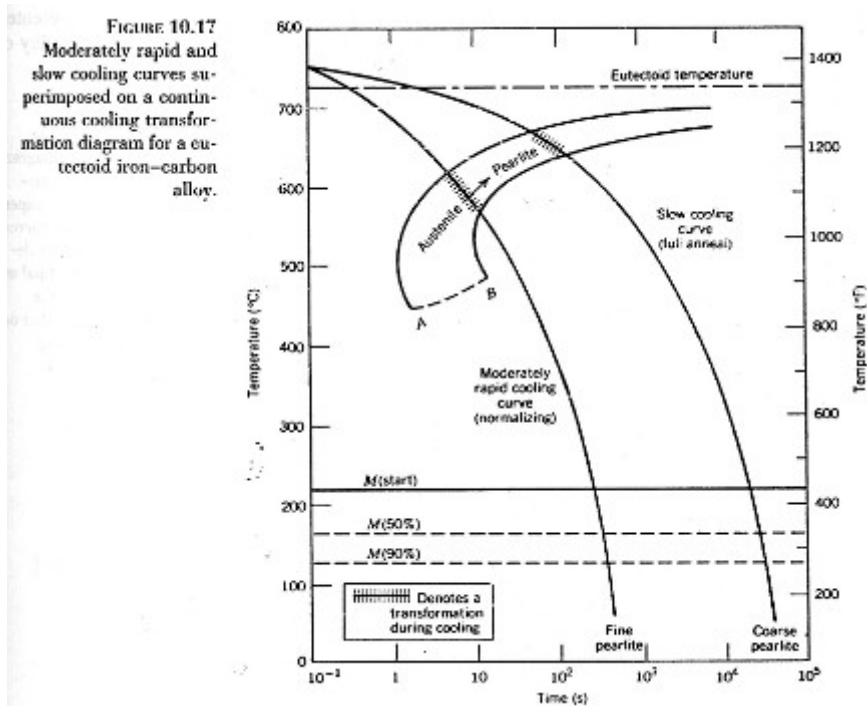
DIAGRAM CONTINUOUS COOLING TRANSFORMATION (CTT) (TRANSFORMASI PENDINGINAN KONTINYU)

Perlakuan panas isothermal pengerjaannya tidak praktis karena temperatur mesti dijaga. Disekitar temperatur eutektoid. Sebagian besar perlakuan panas untuk baja mencakup pendinginan secara kontinyu bahan sampai temperatur ruangan oleh sebab diagram TTT harus disesuaikan untuk pendinginan kontinyu tersebut.

Diagram yang dipakai disebut diagram transformasi pendinginan kontinyu (diagram CTT), bisa dilihat pada gambar 10.16 untuk bahan besi karbon.

FIGURE 10.16
Superimposition of isothermal and continuous cooling transformation diagrams for a eutectoid iron-carbon alloy. (Adapted from H. Boyer, Editor, *Atlas of Isothermal Transformation and Cooling Transformation Diagrams*, American Society for Metals, 1977, p. 376.)





Pada gambar 10.17 diperlihatkan kurva pendinginan cepat dan lambat yang masing-masingnya menghasilkan pearlite halus dan pearlit kasar.

Pada diagram CTT tidak terbentuk bainit karena austenit akan membentuk pearlit pada saat seharusnya terbentuk bainit. Pada pendinginan melewati A-B (gbr 10.17). Austenit yang belum membentuk pearlit akan menjadi martensit ketika melewati garis M (start).

Untuk pendingin kontinu baja panduan dikenal “laju quenching kritis” yaitu laju minimum quenching (pencelupan) yang akan menghasilkan struktur martensit total (gbr 10.18) (laju quenching kritis = laju pendinginan kritis).

SIFAT MEKANIK BESI KARBON

- **PEARLITE**

Sementit bersifat lebih keras dan lebih rapuh dari perlit karena itu dengan menaikkan fraksi Fe_3C pada baja sementara elemen lain konstan maka material akan lebih keras dan lebih kuat, grafik sifat mekanik pearlit bisa dilihat pada gambar 10.20.

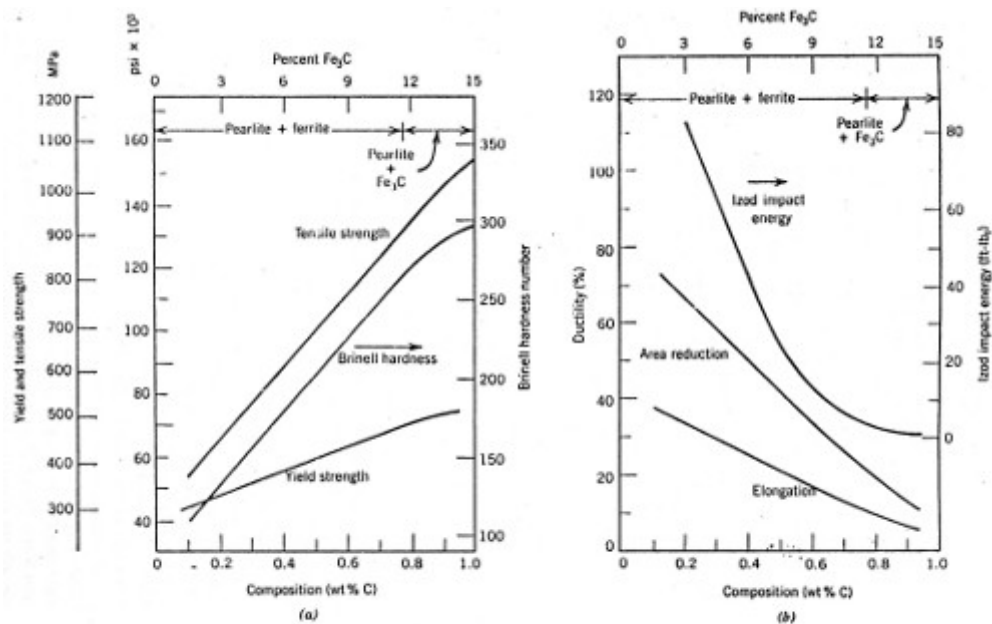


FIGURE 10.20 (a) Yield strength, tensile strength, and Brinell hardness versus carbon concentration for plain carbon steels having microstructures consisting of fine pearlite. (b) Ductility (%EL and %AR) and Izod impact energy versus carbon concentration for plain carbon steels having microstructures consisting of fine pearlite. (Data taken from *Metals Handbook: Heat Treating*, Vol. 4, 9th edition, V. Masseria, Managing Editor, American Society for Metals, 1981, p. 9.)

Ketebalan lapisan pearlit sementit juga mempengaruhi sifat mekanik sifat bahan. Pearlit halus lebih keras dan kuat dibandingkan dengan pearlit kasar. Hal ini diperlihatkan secara grafik pada gambar 10.21

Alasan kenapa pearlit mempunyai sifat ini dikarenakan fase sementit lebih kuat dan kaku dibandingkan ferit yang lebih lunak sehingga bisa menahan deformasi dan dengan kata lain sementit sebagai penguat ferit.

Pearlite halus akan lebih kuat di bandingkan dengan pearlit kasar karena butiran pearlit halus lebih banyak sehingga luas batas fase perunit volume akan lebih kasar sehingga mempunyai kemampuan yang lebih besar menahan gerakan dislokasi.

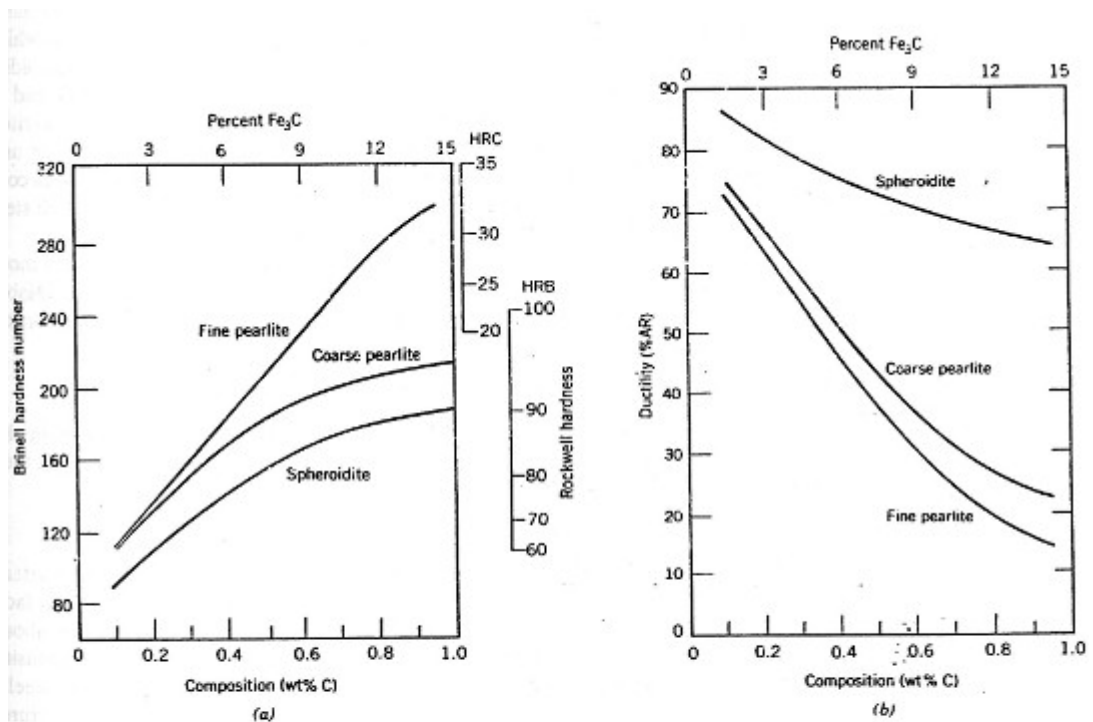


FIGURE 10.21 (a) Brinell and Rockwell hardness as a function of carbon concentration for plain carbon steels having fine and coarse pearlite as well as spheroidite microstructures. (b) Ductility (%AR) as a function of carbon concentration for plain carbon steels having fine and coarse pearlite as well as spheroidite microstructures. (Data taken from *Metals Handbook: Heat Treating*, Vol. 4, 9th edition, V. Masseria, Managing Editor, American Society for Metals, 1981, pp. 9 and 17.)

- **SPHEROITIDE**

Spheroidite mempunyai kekuatan dan kekerasan dibawah pearlit. Fenomena ini bisa diterangkan dengan metode penguatan oleh sementit dan hambatan gerakan dislokasi.

Luas permukaan batas butir spherodit pesatuan volume lebih sedikit dari pearlit sehingga kekuatannya dan kekerasannya lebih rendah.

- **BAINITE**

Karena baja banite mempunyai struktur kristal yang lebih halus maka banite lebih kuat dan keras dari pearlit.

- **MARTENSITE**

Dari bagian bentuk struktur mikro panduan baja, martensit adalah yang paling kuat dan keras namun paling rapuh. Kekerasannya tergantung kandungan karbon. Pengaruh kandungan karbon terhadap kekerasan martensit bisa dilihat pada gbr 10.22. Kekuatan dan kekerasan martensite tidak dikaitkan dengan struktur mikro tetapi lebih dikaitkan dengan efektifitas atom karbon yang larut dalam bentuk interstisi yang akan

menghalangi gerakan dislokasi dan juga karena sistem slip yang lebih sedikit untuk kristal BTC.

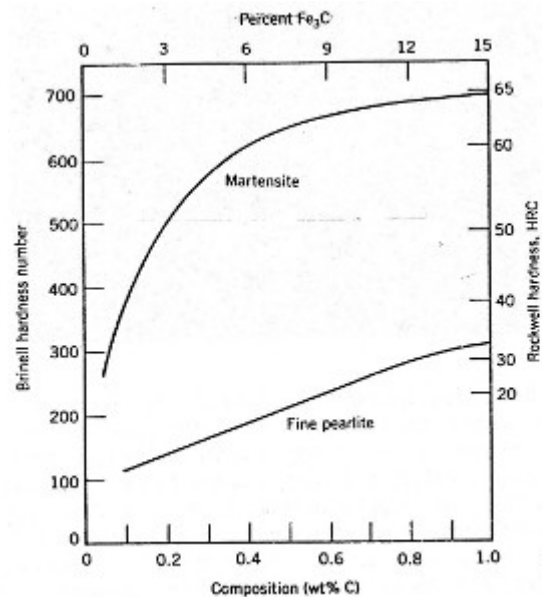


FIGURE 10.22 Hardness as a function of carbon concentration for plain carbon martensitic and fine pearlitic steels. (Adapted from Dr. Edgar C. Bain, *Functions of the Alloying Elements in Steel*, American Society for Metals, 1939, p. 36.)

• TEMPERED MAERTENSITE

Martensit adalah keras sehingga tidak bisa dipakai sebagian besar aplikasi. Disamping itu tegangan internal karena proses quenching juga memberikan efek perlemahan. Ketangguhan dan keuletan martensit bisa ditingkatkan dan tegangan internal bisa dibuang dengan cara perlakuan panas yang disebut tempering.

Tempering dilakukan dengan memanaskan baja martensit sampai temperatur dibawah eutectoid pada periode waktu tertentu. Biasanya tempering dilakukan pada temperatur antara 250-650 °C. Tegangan internal akan hilang pada suhu $\pm 200^{\circ}\text{C}$.

Proses tempering akan membentuk “tempered maertensite”.

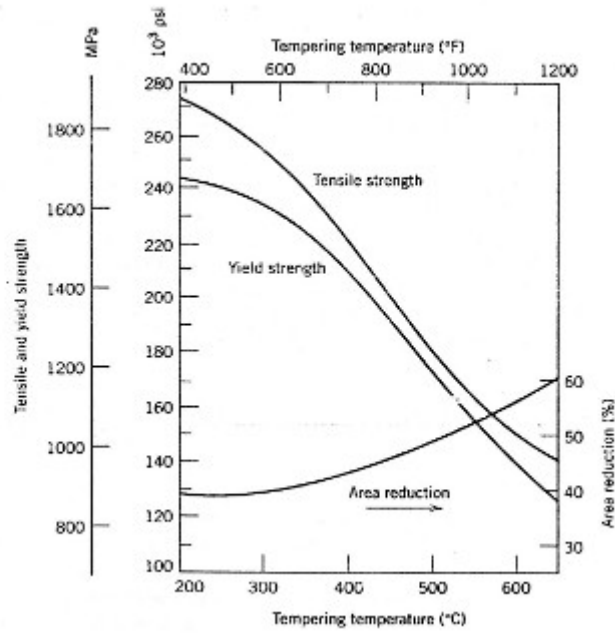
martensite (bct, satu fase) \longrightarrow tempered martensite ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$)

Foto struktur mikro tempered martensite sama dengan spheroidit hanya partikel sementit lebih banyak dan lebih kecil. Tempered martensit mempunyai sifat sekeras dan sekuat matensit namun ketangguhan dan keuletan lebih baik. Hubungan antara tegangan tarik, kekuatan luluh dan keuletan terhadap temperatur temper pada baja paduan bisa dilihat pada gbr 10.24.



FIGURE 10.23 Electron micrograph of tempered martensite. Tempering was carried out at 594°C (1100°F). The small particles are the cementite phase; the matrix phase is α ferrite. 9300 \times . (Copyright 1971 by United States Steel Corporation.)

FIGURE 10.24 Tensile and yield strengths and ductility (%AR) versus tempering temperature for an oil-quenched alloy steel (type 4340). (Adapted from figure furnished courtesy Republic Steel Corporation.)



- **PERAPUHAN TEMPER**

Pada proses tempering beberapa baja bisa mengalami penurunan ketangguhan, hal ini disebut perapuhan temper. Fenomena ini terjadi bila baja ditemper pada suhu diatas 575 °C dan diikuti pendinginan lambat sampai temperatur ruangan, atau jika tempering dilakukan pada suhu antara 375 – 575 °C.

Perapuhan ini disebabkan oleh kandungan elemen lain dalam jumlah yang cukup signifikan seperti mangan, nikel, crom dan phospor, arsen, timah putih. Perapuhan temper bisa dicegah dengan :

1. Pengontrolan komposisi
2. Tempering diatas 575°C atau dibawah 375°C diikuti dengan quenching pada temperatur ruang.

Ketangguhan baja yang telah mengalami perapuhan bisa diperbaiki dengan pemanasan samapai kira-kira 600°C, dan kemudian secara cepat didinginkan sampai temperatur dibawah 300°C.

Soal-soal

1. Sebutkan dua tingkat pembentukan partikel ke fase baru. Jelaskan masing-masingnya.
2. Untuk beberapa transformasi yang mengikuti persamaan Avrami, parameter n mempunyai harga 1,5. Jika setelah 125 s reaksi terbentuk 25%, berapa lama waktu total yang diperlukan sampai reaksi terbentuk 90%.
3. Hitunglah laju beberapa reaksi yang mengikuti kinetik Avrami, asumsikan konstanta n dan k masing-masing adalah 3,0 dan 7×10^{-3} untuk waktu dalam detik.
4. Di bawah ini adalah data fraksi rekristalisasi dan waktu untuk proses rekristalisasi pada 600°C dari baja terdeformasi. Diasumsikan proses mengikuti persamaan Avrami, carilah fraksi rekristalisasi setelah waktu total 22,8 menit.

Fraksi Rekristalisasi	Waktu (min)
0,20	13,1
0,70	29,1

5. Misalkan baja dengan komposisi eutektoid didinginkan ke temperatur 675°C dari 760°C kurang dari 0,5 s dan ditahan pada temperatur ini.
 - a. Berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk reaksi austenite ke pearlite untuk 50% pembentukan, dan 100% pembentukan?
 - b. Perkirakanlah kekerasan paduan yang telah bertransformasi ke pearlite.
6. Secara singkat jelaskanlah perbedaan antara pearlit, bainit, dan spheroidite terhadap struktur mikro dan sifat mekaniknya.
7. Buatlah kopi dari gambar 10.13, dan kemudian buatlah sketsa dan label pada diagram ini untuk menghasilkan struktur mikro berikut:
 - a. 100% pearlite kasar.
 - b. 100% tempered martensite
 - c. 50% pearlite kasar, 25% bainit, dan 25% martensit.
8. Terangkanlah dengan ringkas prosedur perlakuan panas yang paling sederhana yang digunakan untuk merubah baja 0,76 wt%C dari satu struktur ke struktur lainnya, sebagai berikut:
 - a. Spheroidite ke tempered martensite
 - b. Tempered martensite ke pearlite.
 - c. Bainit ke martensite.
 - d. Martensite ke pearlite
 - e. Pearlite ke tempered martensite
 - f. Tempered martensite ke pearlite.
 - g. Bainit ke tempered martensite.

BAB VII

PROSES THERMAL LOGAM PADUAN

Annealing adalah : sebuah perlakuan panas dimana material dipanaskan pada temperatur tertentu dan waktu tertentu dan kemudian dengan perlahan didinginkan.

Annealing dilakukan untuk :

1. Menghilangkan tegangan pada bahan.
2. Meningkatkan keuletan dan ketangguhan.
3. Menghasilkan struktur mikro tertentu.

Proses annealing dibagi atas tiga tingkat :

1. Pemanasan hingga temperatur yang diinginkan.
2. Temperatur dijaga konstan.
3. Pendinginan.

Proses annealing pada logam biasanya dilakukan untuk mengurangi efek “pengerjaan dingin” yaitu melunakkan bahan dan menaikkan keuletan setelah sebelumnya dilakukan pengerasan regangan.

Pada logam bisa terjadi tegangan sisa dalam (internal residual stress), dikarenakan :

1. Proses deformasi plastis karena proses pemesinan (machining) atau proses penggerindaan.
2. Pendinginan yang tidak merata pada proses pengelasan atau pencetakan.
3. Transformasi fasa pada pendinginan karena perbedaan kerapatan/density.

Menghilangkan tegangan sisa bisa dilakukan dengan proses “stress relief annealing” (annealing penghilangan tegangan).

ANNEALING PADUAN BESI

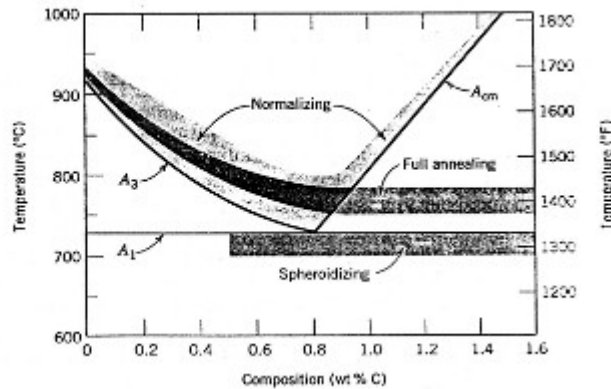
1. NORMALIZING

Baja yang telah mengalami deformasi plastis, misalnya karena proses “rolling” akan mempunyai struktur mikro pearlite yang bentuknya tak beraturan dan ukuran butir

besar-besar dan bervariasi. Untuk membuat struktur pearlite yang lebih halus dan lebih seragam dilakukan proses normalizing.

Normalizing dilakukan dengan pemanasan sampai temperatur 55°C – 85°C diatas temperatur kritis atas hingga baja berubah menjadi austenit, kemudian dilakukan pendinginan di udara. (gb. 11.1).

FIGURE 11.1 The iron-iron carbide phase diagram in the vicinity of the eutectoid, indicating heat treating temperature ranges for plain carbon steels. (Adapted from *Metals Handbook*, T. Lyman, Editor, American Society for Metals, 1948, p. 661.)



2. FULL ANNEAL

Full anneal adalah : baja dipanaskan sampai 15° - 40 ° C diatas garis A₃ atau A₁ (gb. 11.1) hingga tercapai keseimbangan pada struktur austenit, kemudian baja didinginkan di dalam dapur pemanas sampai temperatur ruang.

struktur mikro yang terbentuk : coarse pearlite.

bahan baja biasanya berupa ; baja karbon rendah dan sedang.

3. SPHEROIDIZING

Adalah pemanasan logam sampai temperatur dibawah temperatur eutectoid (grs a₁ pd. Gb. 11.1) atau disekitar 700°C pada daerah $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$. Pemanasan dilakukan antara 15 sampai 25 jam. Pada proses ini Fe₃C akan membentuk partikel spheroid.

Proses ini biasanya dilakukan pada baja karbon sedang dan tinggi. Struktur yang terbentuk : spheroid.

Tujuannya adalah supaya baja mudah dibentuk.

Untuk berhasilnya perlakuan panas untuk membuat bahan baja martensite di keseluruhan penampang bahan dipengaruhi 3 faktor :

1. Komposisi paduan.
2. Tipe dan karakter media pendingin.
3. Ukuran dan bentuk spesimen.

KEMAMPUAN Pengerasan (HARDENABILITY)

pada proses pembentukan baja martensit, diperoleh hasil bahwa makin kedalam maka sifat martensitnya makin berkurang atau baja bagian luar lebih keras dari bagian dalam.

Kemampuan pengerasan : adalah kemampuan paduan logam diperkeras pada pembentukan martensit.

Yang diukur adalah berapa kedalaman pengerasan bahan tersebut.

Uji jominy

Untuk menguji kekerasan karena pembentukan martensit dilakukan dengan “uji jominy end quench” (gb.11.2). Angka kekerasan sebagai fungsi jarak bisa dilihat pada gambar 11.3.

Kadang-kadang lebih disukai untuk melihat kekerasan sebagai fungsi laju pendinginan daripada jarak quenching (gb 11.4). Kemampuan pengerasan dipengaruhi oleh komposisi paduan.

FIGURE 11.2 Schematic diagram of Jominy end-quench specimen (a) mounted during quenching and (b) after hardness testing from the quenched end along a ground flat. (Adapted from A. G. Guy, *Essentials of Materials Science*. Copyright 1978 by McGraw-Hill Book Company, New York.)

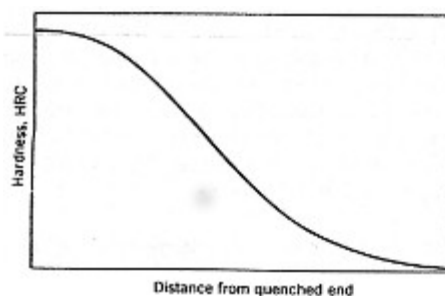
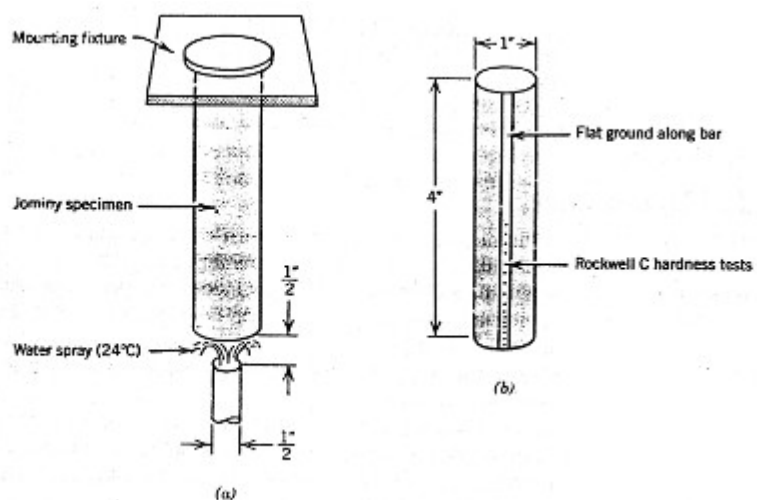


FIGURE 11.3 Typical hardenability plot of Rockwell C hardness as a function of distance from the quenched end.

PENGARUH MEDIA QUENCHING, UKURAN SPESIMEN DAN GEOMETRI

Media quenching : air,oli,udara.

- air media pendingin paling cepat, sedangkan udara paling lambat
- kecepatan media quenching juga mempengaruhi laju pendinginan, makin cepat laju media, makin tinggi laju pendinginan
- Media oli banyak dipakai pada quenching baja paduan
- pada baja karbon tinggi, penggunaan air mengakibatkan laju pendinginan terlalu cepat sehingga terjadi retak atau pembengkokan.

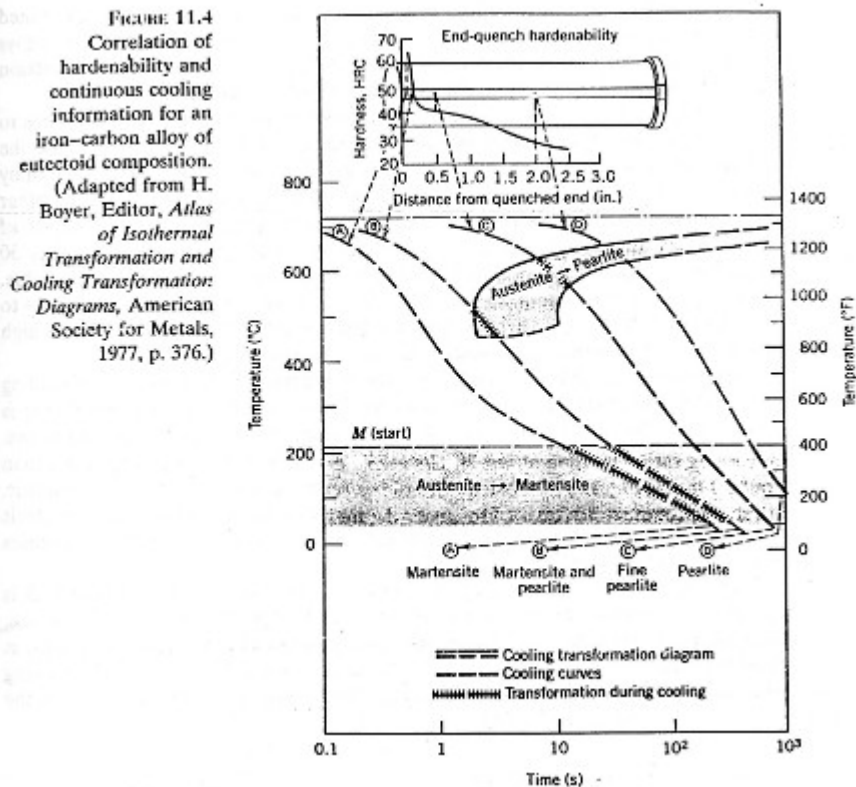
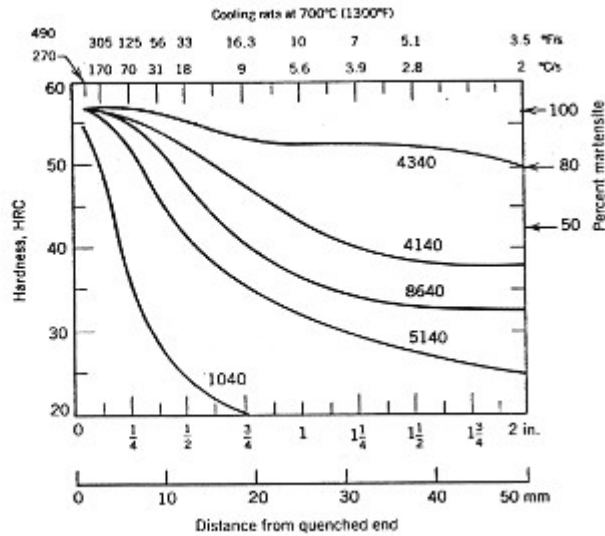


FIGURE 11.5
 Hardenability curves for five different steel alloys, each containing 0.4 wt% C. Approximate alloy compositions (wt%) are as follows: 4340–1.85 Ni, 0.80 Cr, and 0.25 Mo; 4140–1.0 Cr and 0.20 Mo; 8640–0.55 Ni, 0.50 Cr, and 0.20 Mo; 5140–0.85 Cr; 1040 is an unalloyed steel. (Adapted from figure furnished courtesy Republic Steel Corporation.)



Pada proses pendinginan, panas mesti dibuang dari material melalui permukaannya. Oleh sebab itu laju pendinginan kedalam material sangat dipengaruhi oleh bentuk dan ukuran material. Gb 11.8a dan 11.8b memperlihatkan laju pendinginan sebagai fungsi diameter batang logam silinder.

Bentuk spesimen juga mempengaruhi efek pengerasan. Apabila rasio luas permukaan terhadap massa spesimen besar maka makin besar laju spesimen, dan makin dalam efek pengerasan. Bentuk spesimen yang tidak beraturan akan mempunyai rasio luas permukaan terhadap massa yang lebih besar bila dibandingkan dengan bentuk yang beraturan dan bentuk bulat.

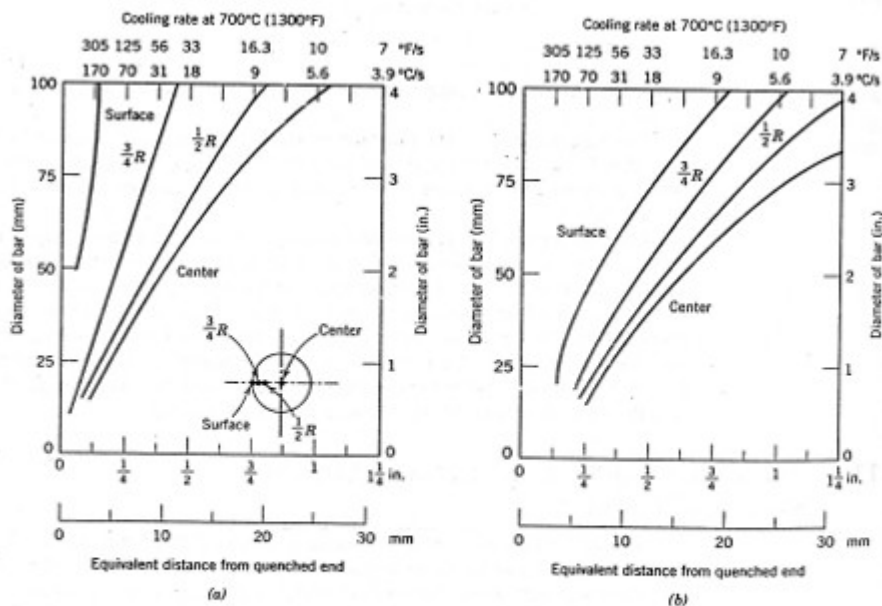


FIGURE 11.8 Cooling rate as a function of diameter at surface, three-quarters radius ($\frac{3}{4}R$), midradius ($\frac{1}{2}R$), and center positions for cylindrical bars quenched in mildly agitated (a) water and (b) oil. Equivalent Jominy positions are included along the bottom axis. (Adapted from *Metals Handbook: Properties and Selection, Irons and Steels*, Vol. 1, 9th edition, B. Bardes, Editor, American Society for Metals, 1978, p. 492.)

PRECIPITATION HARDENING (PENGERASAN PRESIPITASI).

Penguatan dan pengerasan logam paduan bisa ditingkatkan dengan pembentukan penyebaran partikel-partikel dari fasa kedua kedalam matrik fasa yang asli/pertama. Hal ini dilakukan dengan perlakuan panas yang tepat.

Prosesnya disebut precipitation hardening karena partikel-partikel kecil dari fasa yang baru membentuk precipitasi/endapan/menggumpal. Kadang-kadang disebut “age hardening” (pengerasan penuaan) karena proses penguatan terjadi karena proses waktu.

Contoh-contoh logam yang diperkeras dengan pengerasan precipitasi adalah: aluminium-tembaga, tembaga-beryllium, tembaga-timah dan magnesium-aluminium,dll.

Precipitation hardening dan perlakuan baja untuk membentuk maartensit adalah fenomena yang sama sekali berbeda walaupun proses perlakuan panas hampir sama.

Proses precipitation hardening terjadi atas 2 tahap:

1. Solution heat treating
2. Precipitation heat treating

Untuk penjelasan,lihat gb 11.11 dan gb 11.12

1. Solution heat treating :

Pada T_0 struktur logam adalah α , dengan komposisi c_0 . Kemudian dilakukan pendinginan cepat hingga temperatur T_1 yaitu temperatur ruang sehingga fase β tidak bisa terbentuk. Karena itu kondisi logam adalah tidak setimbang/non equilibrium dimana hanya ada fase α jenuh dengan atom β didalamnya. Sifat bahan adalah lunak dan lemah.

2. Precipitation heat treating

Solid solution α yang super jenuh dipanaskan sampai T_2 pada daerah $\alpha + \beta$. Pada temperatur β ini terjadi difusi sehingga terbentuk fase β yang berupa partikel halus dan tersebar dengan komposisi C_β dan prosesnya disebut aging/penuaan. Setelah waktu tertentu paduan didinginkan sampai temperatur kamar.

Grafik proses pemanasan terhadap waktu bisa dilihat pada gb 11.12. Gb 11.13 memperlihatkan pengaruh ‘aging’ terhadap kekuatan bahan.

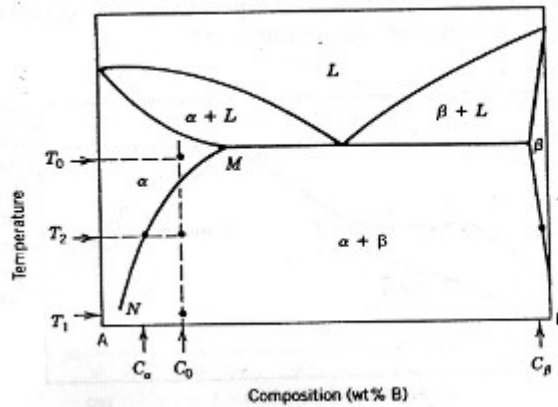


FIGURE 11.11 Hypothetical phase diagram for a precipitation hardenable alloy of composition C_0 .

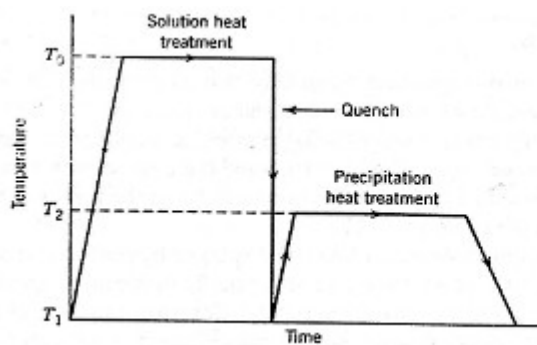


FIGURE 11.12 Schematic temperature-versus-time plot showing both solution and precipitation heat treatments for precipitation hardening.

MEKANISME Pengerasan pada Precipitasi

Pengerasan precipitasi umumnya dilakukan pada paduan aluminium. Proses penguatan dipercepat oleh kenaikan temperatur. Hal ini bisa dilihat pada gb 11.15. Idealnya temperatur dan waktu untuk perlakuan panas. Precipitasi didesain untuk menghasilkan kekerasan atau kekuatan disekitar daerah maksimum. Pada proses precipitasi terjadi distorsi struktur kristal-kristal di sekeliling dan di sekitar partikel dari fase transisi (gb 11.15b) yang akan menghambat deformasi plastis.

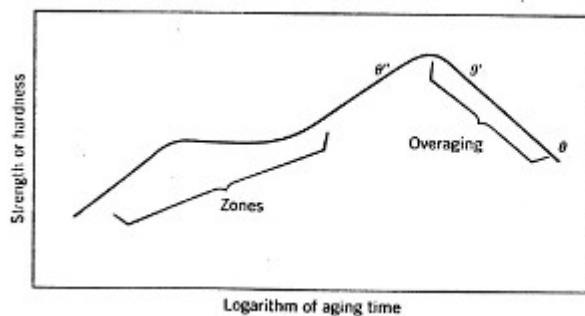


FIGURE 11.13 Schematic diagram showing strength and hardness as a function of the logarithm of aging time at constant temperature during the precipitation heat treatment.

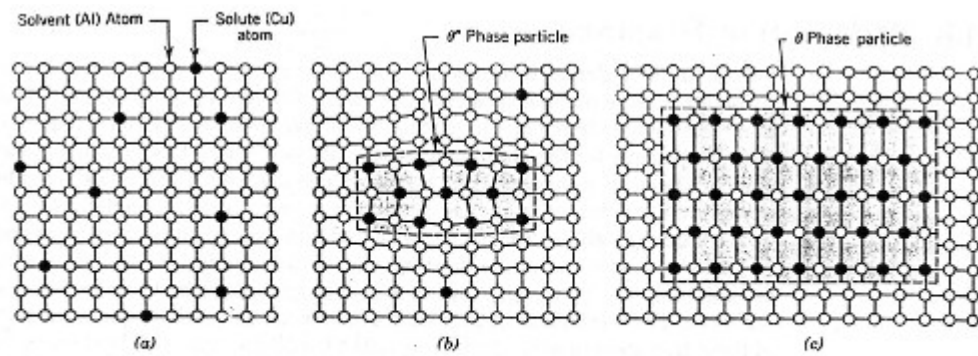


FIGURE 11.15 Schematic depiction of several stages in the formation of the equilibrium precipitate (θ) phase. (a) A supersaturated α solid solution. (b) A transition, θ' , precipitate phase. (c) The equilibrium θ phase, within the α matrix phase. Actual phase particle sizes are much larger than shown here.

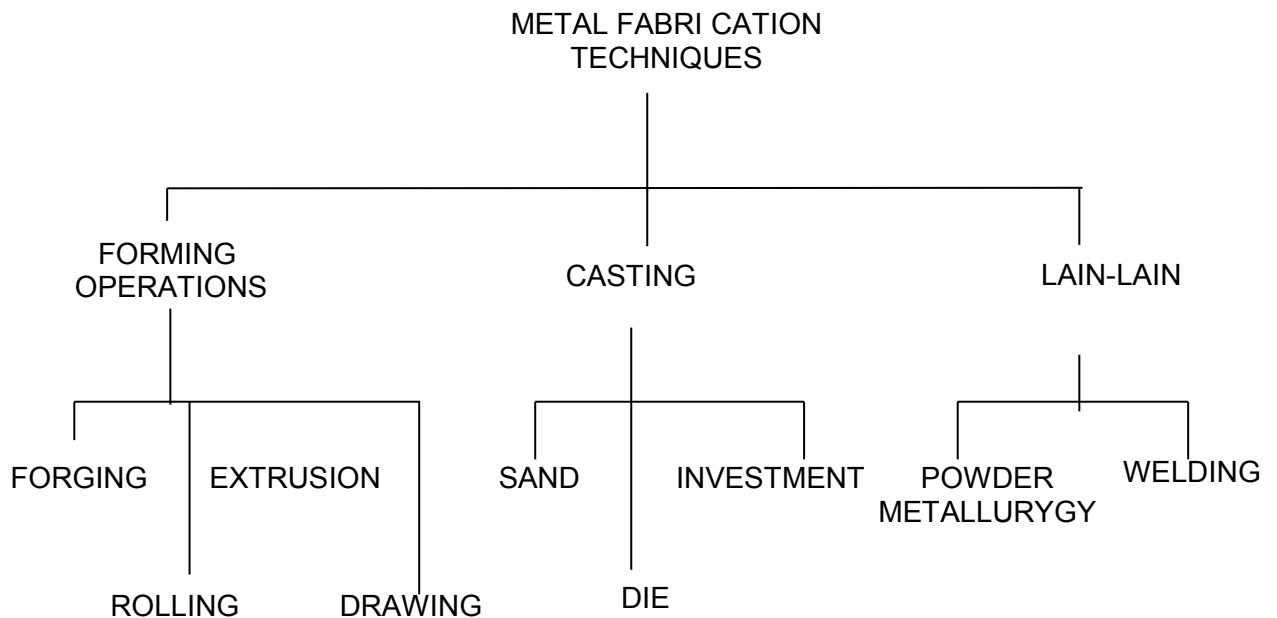
Soal-soal

1. Dengan kalimat anda sendiri, uraikanlah prosedur perlakuan panas baja dan struktur mikro yang terbentuk: full annealing, normalizing, quenching, dan tempering.
2. Sebutkan tiga penyebab terbentuknya tegangan sis pada komponen logam. Apakah konsekuensi yang merugikan dari tegangan ini?
3. Berikanlah jangkauan temperatur dimana memungkinkan untuk membentuk fasa austenit dari paduan besi-karbon berikut selama perlakuan *normalizing* : (a) 0,15 wt% C, (b). 0,50 wt% C, dan (c) 1,10 wt% C.
4. Apakah tujuan dari perlakuan panas spherodizing? Dan paduan apakah yang biasanya dilakukan.
5. Jelaskan apakah perbedaan antara kekerasan dan kemampukerasan.
6. Apakah perbedaan prinsip antara proses penuaan (aging) alami dengan artifisial?

BAB VIII

LOGAM BESI

PABRIKASI LOGAM



Forming operation : adalah dimana bentuk potongan logam dirubah dengan proses defomasi plastis.

Jika proses deformasi plastis dilakukan diatas temperatur reskristalisasi maka proses disebut pengerjaan panas (hot working), sedangkan jika dilakukan dibawah temperatur reskristalisasi disebut pengerjaan dingin (cold working).

- pengerjaan panas :
 - dimungkinkan untuk terjadinya deformasi yang lebih besar
 - energi untuk melakukan deformasi lebih kecil dari cold working
 - permukaan logam mengalami oksidasi

- pengerjaan dingin :
 - kualitas permukaan logam yang lebih baik
 - kontrol dimensi lebih mudah

Proses forging, rolling, exrusion dan drawing bisa dilihat pada gb.12.2.

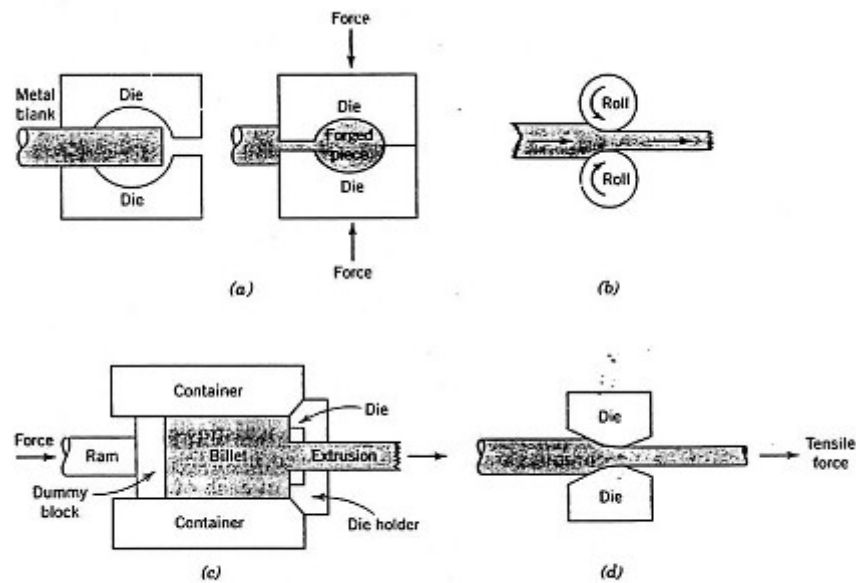


FIGURE 12.2 Metal deformation during (a) forging, (b) rolling, (c) extrusion, and (d) drawing.

Forging:

Dilakukan dengan cara memukul potongan logam. Gaya diberikan pada cetakan yang membentuk produk logam. Contoh produk forging al: pada roda kereta api, kunci kunci, crank shft mobil dll.

Rolling

Proses dilakukan dengan melewati logam pada 2 buah logam yang akan mengkompresi logam sehingga tebalnya berkurang. Produk yang dihasilkan bisa berupa bulat, tiang 1 dan rel kereta api, plat dll.

Extrusion

Batangan logam didorong melalui cetakan dan produk akan berbentuk sesuai yang dikehendaki dan penampang yang lebih kecil. Produk extrusion al; batangan logam/ kawat, tube, dll.

Drawing

Dilakukan dengan cara menarik potongan logam pada sisi keluar cetakan. Batangan logam, kawat, tube adalah produk produk yang bisa dihasilkan dengan drawing.

Casting

Adalah proses pabrikan di mana logam cair dituang.

Casting dilakukan jika :

1. Benyak akhir besar atau complicated
2. Kualitas dan kekuata bukan merupakan pertimbangan utama

3. Bahan logam mempunyai ketahanan rendah sehingga tidak bisa dilakukan "forming operation".
4. Paling ekonomis.

Sand casting (cetakan pasir)

Adalah metoda yang paling umum. Pasir digunakan sebagai bahan cetakan potongan cetakan pasir di buat dengan memadatkan pasir ke pola yang berbentuk dimensi yang diinginkan. Proses pencetakan dilakukan dengan mengalirkan logam cair kedalam cetakan. Contoh produk : silinder blok mobil, fire hydrant, fitting pipa yang besar-besar.

Die casting

Pada die casting, logam didorong masuk cetak pada tekanan tertentu dan kecepatan tinggi dan kemudian logam membeku dengan menjaga tekanan. Cetakannya biasanya dari baja. Cetakan bisa di gunakan berulang-ulang. Logam coran biasanya dipakai yang mempunyai titik leleh rendah seperti: seng, aluminium, dan magnesium.

Investment casting

Pola untuk membuat cetakan biasanya dipakai lilin atau plastik. Disekeliling pola dituang lumpur cair biasanya dari bahan gips. Setelah mengeras cetakan dipanaskan sehingga lilin didalamnya menguap. Cetakan siap digunakan. Teknik ini biasanya digunakan untuk cetakan dengan dengan kualitas tinggi. Dan produk akhir yang tinggi. Contohnya : perhiasan, gigi palsu dll.

TEKNIK-TEKNIK LAIN

Metalurgi bubuk (powder metallurgy)

Dipakai untuk menghasilkan produk akhir yang tingkat kerapatannya tinggi. Proses dilakukan dengan memanfaatkan bubuk logam dan diikuti dengan perlakuan panas.

Pengelasan

Pengelasan dilakukan untuk menyambung dua atau lebih potongan menjadi satu potongan logam. Pengelasan dilakukan apabila membentuk potongan logam menelan biaya tinggi atau susah untuk dilakukan.

PADUAN BESI (FERROUS ALLOUYS)

Paduan besi adalah paduan logam dimana besi paling dominan dan digunakan secara luas didalam masyarakat. Klasifikasi skema berbagai logam besi ditunjukkan berikut ini:

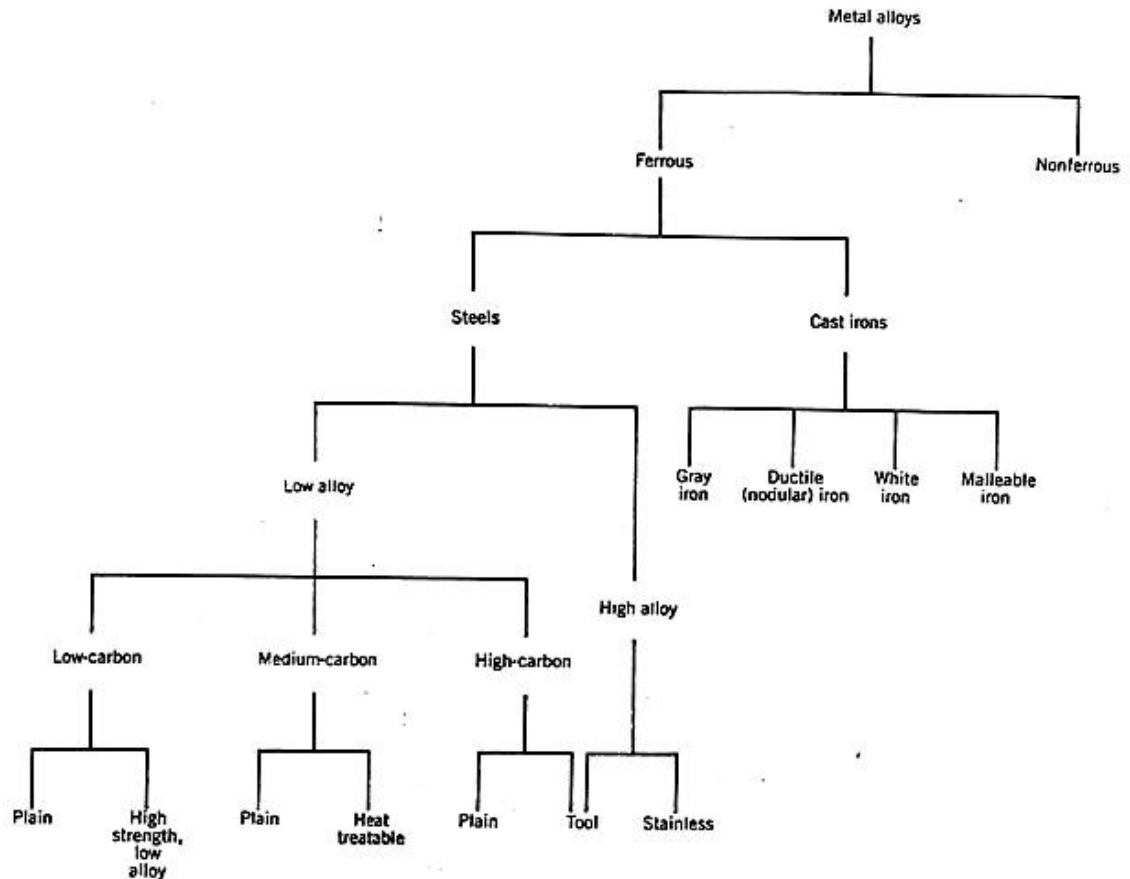


FIGURE 12.4 Classification scheme for the various ferrous alloys.

BAJA

Baja merupakan paduan besi dengan karbon serta sejumlah kecil campuran bahan lainnya. Kandungan karbon biasanya kurang dari 1,0 wt%. Berdasarkan kandungan karbon, baja dibagi atas baja karbon rendah, sedang dan tinggi.

Baja Karbon Rendah

Baja karbon rendah mengandung karbon (0,25wt%) berdasarkan kandungan karbon baja ini bersifat tidak responsif terhadap perlakuan panas yang bertujuan untuk membentuk martensit. Penguatan dilakukan dengan :

- struktur mikro berupa : ferit +pearlite.
- sifat : - lunak dan lemah tetapi keuletan dan tangguhan sangat tinggi
 - mudah di "machining", di las
 - diantara semua baja karbon, paling murah di produksi.

- aplikasi : komponen bodi mobil, baja, struktur (tiang I. C, dll), pipa gedung, jembatan , kaleng.

Beberapa baja karbon rendah bisa dilihat pada tabel 12.1a dan 12.1b.

High strength, low-alloy (HSLA) : adalah baja karbon rendah yang ditambah unsur lain seperti : tembaga, vanadium, nikel, molibdenum yang akan menaikkan kekuatan baja.

Baja karbon sedang

- baja ini mengandung karbon kira-kira 0,2-0.60wt %.
- bisa diberikan perlakuan panas : austenitizing, quenching ,dan tempering untuk menaikkan sifat mekanik.
- sering digunakan dalam bentuk struktur martensite.
- penambahan chrom, nikel dan molibdenum meningkatkan kemampuan untuk perlakuan panas.
- baja yang telah mengalami perlakuan panas lebih kuat dari pada baja karbon rendah namun keuletan dan ketangguhannya menurun.
- aplikasi : roda kereta api, rel, roda gigi, crank shaft, dan komponen mesin yang membutuhkan kekuatan tinggi.

Beberapa type baja karbon sedang bisa dilihat pada tabel :12.2a dan 12.2b

Baja karbon tinggi

- kandungan karbon antara 0,60-1,4 %wt.
- mempunyai sifat : paling keras, paling kuat namun keuletan paling rendah.
- umumnya digunakan dalam kondisi sudah diperkeras dan ditemper. Sehingga tahan aus dan mampu menahan alat potong yang tajam.
- campuran bahan lain berupa chrom, vanadium, tungsten molibdenum dan banyak digunakan untuk baja tool dan baja cetak.
- pemakaian : pisau, pisau cukur, gergaji, pegas dan kawat.

Baja anti karat (stainless steel)

- elemen paduan utama : chrom (>11wt%).
- dibagi atas tiga jenis :
 - baja anti karat martensitic
 - baja anti karat feritic.
 - baja anti karat austenitic
- baja martensitic bisa diberikan perlakuan panas sementara baja feritic dan austenitic tidak bisa.

- penguatan baja anti karat feritic dan austenitic dilakukan dengan pengerjaan dingin.
- martensitic dan feritic stainless bersifat magnet sedangkan baja anti karat austenitic tidak.

Penomoran Baja

Titik pembagi antara baja dan besi cor adalah kandungan karbon baja adalah 2,11%, dimana pada daerah ini bisa terjadi reaksi *eutektik*. Pada baja, kita konsentrasi di daerah *eutektik* (Gambar 12.2) dimana garis kelarutan dan isothermal eutektoid terlihat. A_3 memperlihatkan temperatur dimana ferit mulai terbentuk pada proses pendinginan; A_{cm} memperlihatkan temperatur dimana *sementit* mulai terbentuk; dan A_1 adalah temperatur eutektoid.

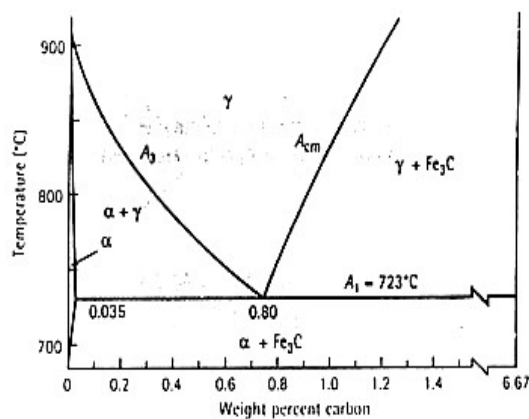


Figure 12.2
The eutectoid portion
of the Fe-Fe₃C phase
diagram.

Hampir semua perlakuan panas baja diarahkan untuk mendapatkan struktur campuran *ferit* dan *sementit*. Gambar 12.3 memperlihatkan tiga susunan struktur mikro ferit dan sementit yang biasanya dibuat. *Pearlit* mempunyai struktur *lamellar* (berlapis) ferit dengan sementit. Pada *Bainit*, sementit lebih bulat daripada pearlit. *Martensit* mempunyai struktur campuran halus dan hampir bulat sementit di dalam ferit.

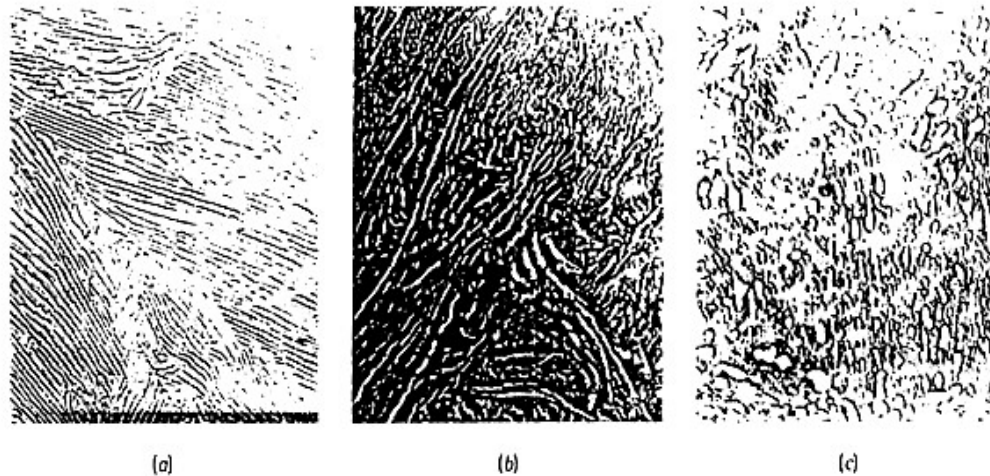


Figure 12.3
Electron micrographs of (a) pearlite, (b) bainite, and (c) tempered martensite, illustrating the differences in cementite size and shape among these three microconstituents ($\times 7500$). (From *The Making, Shaping, and Treating of Steel, 10th Ed.*, Courtesy Association of Iron and Steel Engineers.)

AISI (American Iron and Steel Institute) dan SAE (Society of Automotive Engineers) mempunyai sistem pengelompokan seperti pada tabel 1. Dimana digunakan 4 atau 5 digit angka. Dua angka pertama merujuk pada elemen pepadu utama, dan dua atau tiga angka berikutnya merujuk kepada persentase karbon. Misal: baja AISI 1040 adalah baja karbon dengan kandungan karbon 0,40%.

Tabel 1. Komposisi beberapa baja BS dan AISI-SAE.

Nomor AISI-SAE	Grade BS setara	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Cr	Lainnya
1020	040A20	0,18-0,23	0,30-0,60				
1040	080A40	0,37-0,44	0,60-0,90				
1060	080A62	0,55-0,65	0,60-0,90				
1080	070A78	0,75-0,88	0,60-0,90				
1095	060A96	0,90-1,03	0,30-0,50				
1140	212M44	0,37-0,44	0,70-1,00				0,08-0,13% S
4140	708M40	0,38-0,43	0,75-1,00	0,15-0,30		0,80-1,10	0,15-0,25%Mo
4340	817M49	0,38-0,43	0,60-0,80	0,15-0,30	1,65-2,0	0,70-0,90	0,20-0,30%Mo
4620	665H20	0,17-0,22	0,45-0,65	0,15-0,30	1,65-2,0		0,20-0,30%Mo
52100	534A99	0,98-1,10	0,25-0,45	0,15-0,30			
8620	805H20	0,18-0,23	0,70-0,90	0,15-0,30	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25%V
9260	250A58	0,56-0,64	0,75-1,00	1,80-2,20			

Perlakuan Panas Sederhana

Empat perlakuan panas sederhana yaitu: *annealing* proses, *annealing*, *normalising*, dan *pheroidising* umum dipakai pada baja (Gambar 12.4). Perlakuan panas ini bertujuan untuk mencapai salah satu dari: 1. menghilangkan efek pengerjaan dingin, 2. mengontrol penguatan dispersi dan 3. meningkatkan kemampumesinan.

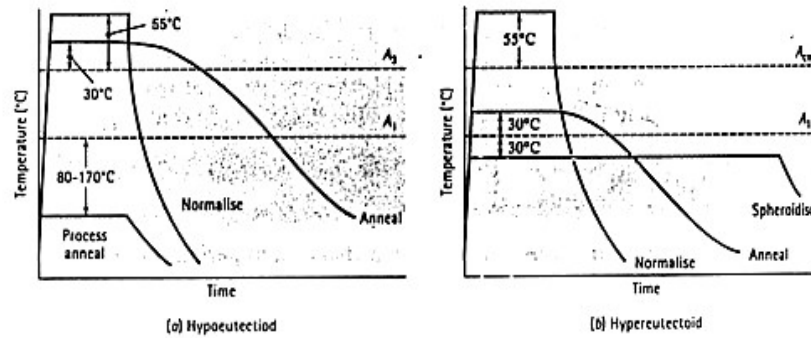


Figure 12.4
Schematic summary of the simple heat treatments for (a) hypoeutectoid steels and (b) hypereutectoid steels.

Annealing proses - Menghilangkan efek pengerjaan dingin. Perlakuan panas rekristalisasi digunakan untuk menghilangkan efek pengerjaan dingin pada baja yang kandungan karbonnya kurang dari 0,25% dan disebut *Anneal proses*. Anneal proses dilakukan pada suhu 80°C hingga 170°C dibawah temperatur A_1 . Ini diatas temperatur rekristalisasi ferit.

Annealing dan Normalising - Penguatan Dispersi. Baja bisa diperkuat dengan dispersi dengan mengatur kehalusan butir pearlit. Baja pertama-tama dipanaskan untuk menghasilkan austenit yang homogen, langkah ini disebut *austenising*. *Annealing* atau *anneal penuh* (full anneal) adalah mendinginkan baja secara perlahan pada dapur pemanas sehingga menghasilkan butiran pearlit kasar. *Normalising* adalah mendinginkan baja secara cepat, di udara, sehingga menghasilkan butiran pearlit halus. Gambar 12.5 memperlihatkan sifat-sifat yang diperoleh pada proses annealing dan normalising pada baja karbon biasa.

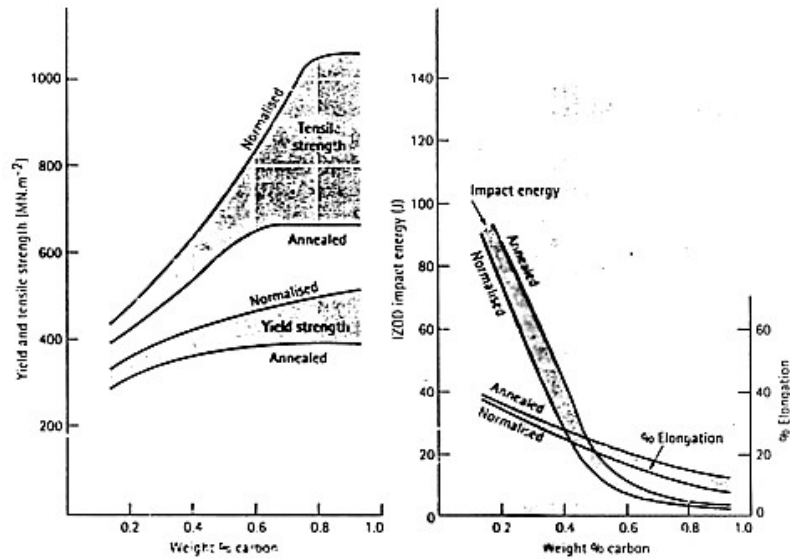


Figure 12.5
The effect of carbon and heat treatment on the properties of plain carbon steels.

Pada annealing, pembentukan austenit (austenising) baja hypoeutectoid dilakukan kira-kira 30°C diatas A_3 , menghasilkan 100% γ . Austenising untuk baja hypereutectoid dilakukan pada kira-kira 30°C diatas A_1 , menghasilkan austenit dan Fe_3C ; proses ini mencegah pembentukan bentukan yang getas, lapisan tipis kontinyu Fe_3C di batas butir yang terjadi pada pendinginan pelan dari daerah 100% γ . Pada kedua kasus ini dihasilkan pearlit kasar dengan kekuatan rendah namun keuletan tinggi.

Pada normalising, austenising dilakukan pada kira-kira 55°C diatas A_3 atau A_{cm} ; baja kemudian dikeluarkan dari dapur pemanas dan didinginkan di udara. Pendinginan cepat menghasilkan pearlit halus yang mempunyai kekuatan lebih tinggi.

Spheroidising - Meningkatkan Kemampumesinan. Baja karbon tinggi yang mengandung sejumlah besar Fe_3C mempunyai karakteristik pemesinan rendah. Selama perlakuan *spheroidising*, yang dilakukan beberapa jam pada suhu kira-kira 30°C dibawah A_1 , Fe_3C berubah bentuk menjadi partikel besar, speris yang mengurangi area butir. Struktur mikronya disebut karbida spheroid, mempunyai matriks ferit kontinyu yang lunak dan mampu dimesin (gambar 6). Struktur sejenis didapatkan bila *martensit* di temper sedikit dibawah A_1 untuk waktu yang lama.

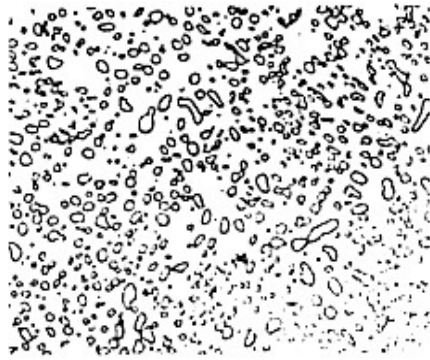


Figure 12.6
The microstructure of spheroidised carbide, with Fe_3C particles dispersed in a ferrite matrix (x 850).
(From Metals Handbook, Vol. 7, 8th Ed., American Society for Metals, 1972)

BESI TUANG

Besi tuang adalah paduan besi dengan kadar karbon diatas 2.1%wt. Umumnya kadar karbon berkisar antara 3,0-4,5wt%.

- titik leleh : 1150° - 1300° c, lebih rendah dari baja
- mempunyai sifat rapuh/getas.
- pembentukan grafit dipengaruhi oleh : kadar si>1%.
- besi tuang umumnya berupa : besi tuang kelabu, besi tuang nodular, besi tuang putih, dan besi tuang maliable.

Besi tuang kelabu (gray cast iron)

- diproses melalui pendinginan pelan —► struktur : ferit+perlit dan grafit yang berbentuk panjang serpihan.

Grafit merupakan karbon bebas yang kekuatannya sangat rendah sekitar 1kg/mm^2 . Sifat besi tuang sangat dipengaruhi oleh bentuk grafit.

- Sifat-sifat :
 - kekuatannya relatif rendah
 - getas, keuletan rendah
 - tahan terhadap panas, korosi, dan aus
 - mampu meredam getaran
 - memiliki sifat mampu potong (machining ability) yang baik
- biaya pembuatan murah .
- aplikasi : blok mesin, rangka mesin, perkakas, rangka mesin-mesin lainnya.

Besi tuang nodular

Perbedaan dengan besi tuang kelabu adalah bentuk grafitnya berbentuk bulat. Bentuk grafitnya yang bulat karena dengan bahan sejumlah kecil magnesium (Mg), cerium (Ce) kedalam besi tuang kelabu. Keuletan dan kekuatan besi tuang nodular lebih tinggi dari besi tuang kelabu.

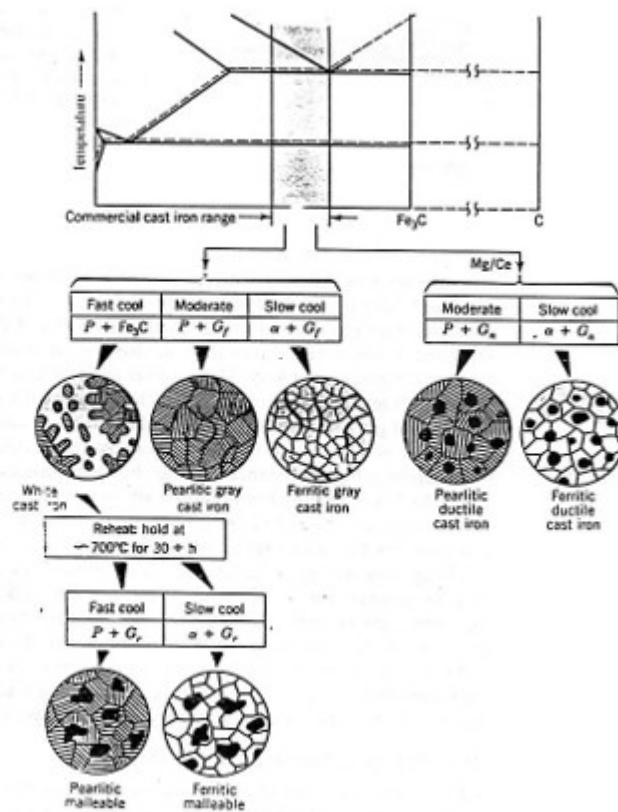
Besi tuang putih

Pada besi tuang putih, kandungan karbonnya tidak membentuk grafit melainkan karbida (Fe_3C). Sifat besi tuang ini sangat keras dan cocok untuk digunakan pada peralatan dengan ketahanan aus tinggi seperti alat-alat penghancur (crusher), alat-alat pertambangan, dll.

Besi tuang malleable

Besi tuang dibuat dengan memberi proses perlakuan panas pada besi tuang putih sehingga kekerasannya menurun.

FIGURE 12.8 From the iron-carbon phase diagram, composition ranges for commercial cast irons. Also shown are microstructures that result from a variety of heat treatments. G_f , flake graphite; G_r , graphite rosettes; G_n , graphite nodules; P , pearlite; α , ferrite. (Adapted from W. G. Moffatt, G. W. Peairall, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. 1, *Structure*, p. 195. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)



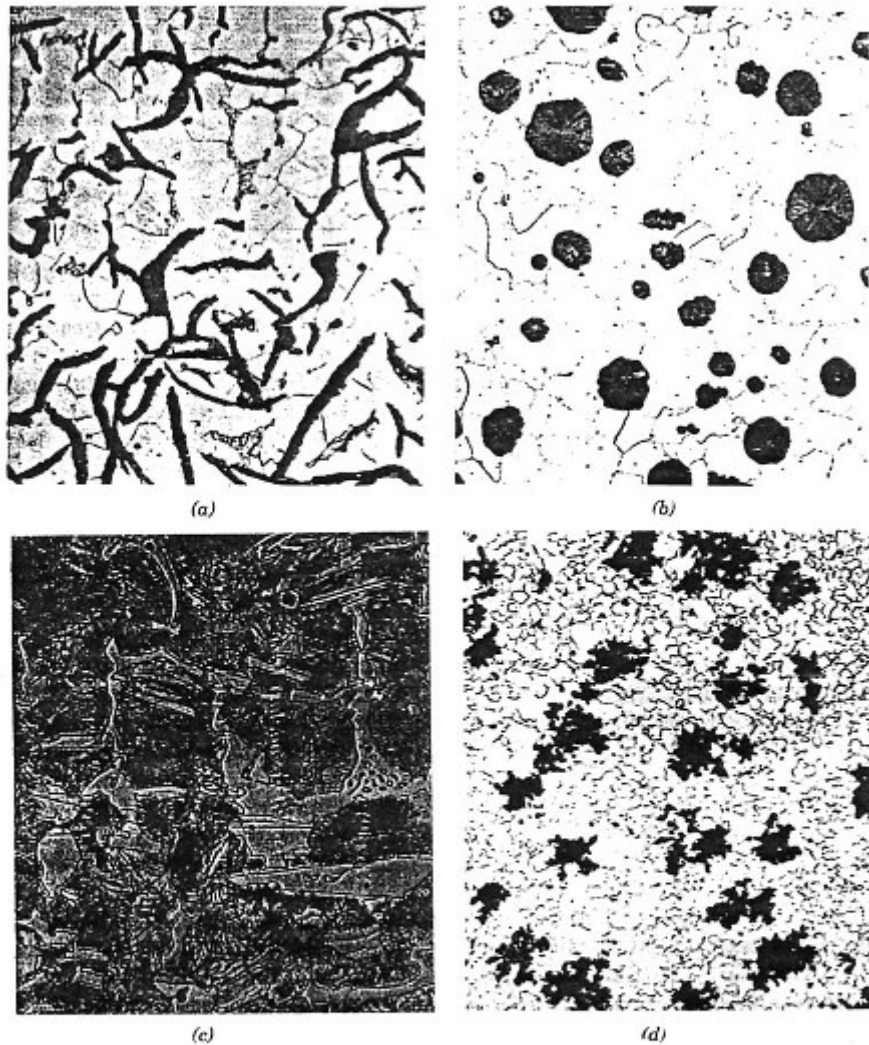


FIGURE 12.6 Optical photomicrographs of various cast irons. (a) Gray iron: the dark graphite flakes are embedded in an α -ferrite matrix. 500 \times . (Courtesy of C. H. Brady, National Bureau of Standards, Washington, D.C.) (b) Nodular (ductile) iron: the dark graphite nodules are surrounded by an α -ferrite matrix. 200 \times . (Courtesy of C. H. Brady and L. C. Smith, National Bureau of Standards, Washington, D.C.) (c) White iron: the light cementite regions are surrounded by pearlite, which has the ferrite–cementite layered structure. 400 \times . (Courtesy of Amcast Industrial Corporation.) (d) Malleable iron: dark graphite rosettes (temper carbon) in an α -ferrite matrix. 150 \times . (Reprinted with permission of the Iron Castings Society, Des Plaines, IL.)

Table 12.1a Compositions of Five Plain Low-Carbon Steels and Three High-Strength, Low-Alloy Steels

<i>Designation^a</i>		<i>Composition (wt%)^b</i>		
<i>AISI/SAE or ASTM Number</i>	<i>UNS Number</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Other</i>
<i>Plain Low-Carbon Steels</i>				
1010	G10100	0.10	0.45	
1020	G10200	0.20	0.45	
A36	K02600	0.29	1.00	0.20 Cu (min)
A516 Grade 70	K02700	0.31	1.00	0.25 Si
<i>High-Strength, Low-Alloy Steels</i>				
A440	K12810	0.28	1.35	0.30 Si (max), 0.20 Cu (min)
A633 Grade E	K12002	0.22	1.35	0.30 Si, 0.08 V, 0.02 N, 0.03 Nb
A656 Grade 1	K11804	0.18	1.60	0.60 Si, 0.1 V, 0.20 Al, 0.015 N

^a The codes used by the American Iron and Steel Institute (AISI), the Society of Automotive Engineers (SAE), and the American Society for Testing and Materials (ASTM), and in the Uniform Numbering System (UNS) are explained in the text.

^b Also a maximum of 0.04 wt% P, 0.05 wt% S, and 0.30 wt% Si (unless indicated otherwise).

Source: Adapted from *Metals Handbook: Properties and Selection, Irons and Steels*, Vol. 1, 9th edition, B. Bardes (Editor), American Society for Metals, 1978, pp. 185, 407.

Table 12.1b Mechanical Characteristics of Hot-Rolled Material and Typical Applications for Various Plain Low-Carbon and High-Strength, Low-Alloy Steels

<i>AISI/SAE or ASTM Number</i>	<i>Tensile Strength [MPa (ksi)]</i>	<i>Yield Strength [MPa (ksi)]</i>	<i>Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]</i>	<i>Typical Applications</i>
<i>Plain Low-Carbon Steels</i>				
1010	325 (47)	180 (26)	28	Automobile panels, nails, and wire
1020	380 (55)	205 (30)	25	Pipe; structural and sheet steel
A36	400 (58)	220 (32)	23	Structural (bridges and buildings)
A516 Grade 70	485 (70)	260 (38)	21	Low-temperature pres- sure vessels
<i>High-Strength, Low-Alloy Steels</i>				
A440	435 (63)	290 (42)	21	Structures that are bolted or riveted
A633 Grade E	520 (75)	380 (55)	23	Structures used at low ambient temperatures
A656 Grade 1	655 (95)	552 (80)	15	Truck frames and rail- way cars

Table 12.2a AISI/SAE and UNS Designation Systems and Composition Ranges for Plain Carbon Steel and Various Low-Alloy Steels

AISI/SAE Designation ^a	UNS Designation	Composition Ranges (wt% of Alloying Elements in Addition to C) ^b			
		Ni	Cr	Mo	Other
10xx, Plain carbon	G10xx0				
11xx, Free machining	G11xx0				0.08–0.33S
12xx, Free machining	G12xx0				0.10–0.35S, 0.04–0.12P
13xx	G13xx0				1.60–1.90Mn
40xx	G40xx0			0.20–0.30	
41xx	G41xx0		0.80–1.10	0.15–0.25	
43xx	G43xx0	1.65–2.00	0.40–0.90	0.20–0.30	
46xx	G46xx0	0.70–2.00		0.15–0.30	
48xx	G48xx0	3.25–3.75		0.20–0.30	
51xx	G51xx0		0.70–1.10		
61xx	G61xx0		0.50–1.10		0.10–0.15V
86xx	G86xx0	0.40–0.70	0.40–0.60	0.15–0.25	
92xx	G92xx0				1.80–2.20Si

^a The carbon concentration, in weight percent times 100, is inserted in the place of “xx” for each specific steel.

^b Except for 13xx alloys, manganese concentration is less than 1.00 wt%.

Except for 12xx alloys, phosphorus concentration is less than 0.35 wt%.

Except for 11xx and 12xx alloys, sulfur concentration is less than 0.04 wt%.

Except for 92xx alloys, silicon concentration varies between 0.15 and 0.35 wt%.

Table 12.2b Typical Applications and Mechanical Property Ranges for Oil-Quenched and Tempered Plain Carbon and Alloy Steels

AISI Number	UNS Number	Tensile Strength {MPa (ksi)}	Yield Strength {MPa (ksi)}	Ductility {%EL in 50 mm (2 in.)}	Typical Applications
<i>Plain Low-Carbon Steels</i>					
1040	G10400	605–780 (88–113)	430–585 (62–85)	33–19	Crankshafts, bolts
1080 ^a	G10800	800–1310 (116–190)	480–980 (70–142)	24–13	Chisels, hammers
1095 ^a	G10950	760–1280 (110–186)	510–830 (74–120)	26–10	Knives, hacksaw blades
<i>Alloy Steels</i>					
4063	G40630	786–2380 (114–345)	710–1770 (103–257)	24–4	Springs, hand tools
4340	G43400	980–1960 (142–284)	895–1570 (130–228)	21–11	Bushings, aircraft tubing
6150	G61500	815–2170 (118–315)	745–1860 (108–270)	22–7	Shafts, pistons, gears

^a Classified as high-carbon steels.

Table 12.3 Designations, Compositions, and Applications for Six Tool Steels

AISI Number	UNS Number	Composition (wt%)*						Typical Applications
		C	Cr	Ni	Mo	W	V	
M1	T11301	0.85	3.75	0.30 max	8.70	1.75	1.20	Drills, saws; lathe and planer tools
A2	T30102	1.00	5.15	0.30 max	1.15	—	0.35	Punches, embossing dies
D2	T30402	1.50	12	0.30 max	0.95	—	1.10 max	Cutlery, drawing dies
O1	T31501	0.95	0.50	0.30 max	—	0.50	0.30 max	Shear blades, cutting tools
S1	T41901	0.50	1.40	0.30 max	0.50 max	2.25	0.25	Pipe cutters, concrete drills
W1	T72301	1.10	0.15 max	0.20 max	0.10 max	0.15 max	0.10 max	Blacksmith tools, wood-working tools

* The balance of the composition is iron. Manganese concentrations range between 0.10 and 1.4 wt%, depending on alloy; silicon concentrations between 0.20 and 1.2 wt% depending on alloy.

Source: Adapted from *ASM Handbook, Vol. 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH, 44073-0002.

Table 12.5 Designations, Minimum Mechanical Properties, Approximate Compositions, and Typical Applications for Various Gray, Nodular, and Malleable Cast Irons

Grade	UNS Number	Composition (wt%)*	Matrix Structure	Mechanical Properties			Typical Applications
				Tensile Strength [MPa (ksi)]	Yield Strength [MPa (ksi)]	Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]	
Gray Iron							
SAE G1800	F10004	3.40-3.7 C, 2.55 Si, 0.7 Mn	Ferrite + Pearlite	124 (18)	—	—	Miscellaneous soft iron castings in which strength is not a primary consideration
SAE G2500	F10005	3.2-3.5 C, 2.20 Si, 0.8 Mn	Ferrite + Pearlitic	173 (25)	—	—	Small cylinder blocks, cylinder heads, pistons, clutch plates, transmission cases
SAE G4000	F10008	3.0-3.3 C, 2.0 Si, 0.8 Mn	Pearlitic	276 (40)	—	—	Discard engine castings, liners, cylinders, and pistons
Ductile (Nodular) Iron							
ASTM A536 60-40-18	F32800	3.5-3.8 C, 2.0-2.8 Si, 0.05 Mg, <0.20 Ni, <0.10 Mo	Ferrite	414 (60)	276 (40)	18	Pressure-containing parts such as valve and pump bodies
100-70-03	F34800		Pearlitic	689 (100)	483 (70)	3	
120-90-02	F36200		Tempered martensitic	827 (120)	621 (90)	2	
Malleable Iron							
12510	F22200	2.3-2.7 C, 1.0-1.75 Si, <0.55 Mn	Ferrite	345 (50)	224 (32)	10	General engineering service at normal and elevated temperatures
45006	—	2.4-2.7 C, 1.25-1.55 Si, <0.55 Mn	Ferrite + Pearlitic	448 (65)	310 (45)	6	

* The balance of the composition is iron.

Source: Adapted from *ASM Handbook, Vol. 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH, 44073-0002.

Table 12.4 Designations, Compositions, Mechanical Properties, and Typical Applications for Austenitic, Ferritic, Martensitic, and Precipitation-Hardenable Stainless Steels

AISI Number	UNS Number	Composition (wt%)*	Condition ^b	Mechanical Properties			Typical Applications
				Tensile Strength [MPa (ksi)]	Yield Strength [MPa (ksi)]	Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]	
Ferritic							
409	S40900	0.08 C, 11.0 Cr, 1.0 Mn, 0.50 Ni, 0.75 Ti	Annealed	380 (55)	205 (30)	20	Automotive exhaust components, tanks for agricultural sprays
446	S44600	0.20 C, 25 Cr, 1.5 Mn	Annealed	515 (75)	275 (40)	20	Valves (high temperature), glass molds, combustion chambers
Austenitic							
304	S30400	0.08 C, 19 Cr, 9 Ni, 2.0 Mn	Annealed	515 (75)	205 (30)	40	Chemical and food processing equipment, cryogenic vessels
316L	S31603	0.03 C, 17 Cr, 12 Ni, 2.5 Mo, 2.0 Mn	Annealed	485 (70)	170 (25)	40	Welding construction
Martensitic							
410	S41000	0.15 C, 12.5 Cr, 1.0 Mn	Annealed Q & T	485 (70) 825 (120)	275 (40) 620 (90)	20 12	Rifle barrels, cutlery, jet engine parts
440A	S44002	0.70 C, 17 Cr, 0.75 Mo, 1.0 Mn	Annealed Q & T	725 (105) 1790 (260)	415 (60) 1650 (240)	20 5	Cutlery, bearings, surgical tools
Precipitation Hardenable							
17-7PH	S17700	0.09 C, 17 Cr, 7 Ni, 1.0 Al, 1.0 Mn	Precipitation hardened	1450 (210)	1310 (190)	1-6	Springs, knives, pressure vessels

*The balance of the composition is iron.

^b Q & T denotes quenched and tempered.

Source: Adapted from *ASM Handbook*, Vol. 1, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH, 44073-0002.

Table 12.6 Compositions, Mechanical Properties, and Typical Applications for Eight Copper Alloys

Alloy Name	UNS Number	Composition (wt%) ^a	Condition	Mechanical Properties			Typical Applications
				Tensile Strength [MPa (ksi)]	Yield Strength [MPa (ksi)]	Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]	
<i>Wrought Alloys</i>							
Electrolytic tough pitch	C11000	0.04 O	Annealed	220 (32)	69 (10)	45	Electrical wire, rivets, screening, gaskets, pans, nails, roofing
Beryllium copper	C17200	1.9 Be, 0.20 Co	Precipitation Hardened	1140–1310 (165–190)	690–860 (100–125)	4–10	Springs, bellows, firing pins, bushings, valves, diaphragms
Cartridge brass	C26000	30 Zn	Annealed	300 (44)	75 (11)	68	Automotive radiator cores, ammunition components, lamp fixtures, flashlight shells, kickplates
			Cold-worked (H04 hard)	525 (76)	435 (63)	8	
Phosphor bronze, 5% A	C51000	5 Sn, 0.2 P	Annealed	325 (47)	130 (19)	64	Bellows, clutch disks, diaphragms, fuse clips, springs, welding rods
			Cold-worked (H04 hard)	560 (81)	515 (75)	10	
Copper-nickel, 30%	C71500	30 Ni	Annealed	380 (55)	125 (18)	36	Condenser and heat-exchanger components, saltwater piping
			Cold-worked (H02 hard)	515 (75)	485 (70)	15	
<i>Cast Alloys</i>							
Leaded yellow brass	C85400	29 Zn, 3 Pb, 1 Sn	As cast	234 (34)	83 (12)	35	Furniture hardware, radiator fittings, light fixtures, battery clamps
Tin bronze	C90500	10 Sn, 2 Zn	As cast	310 (45)	152 (22)	25	Bearings, bushings, piston rings, steam fittings, gears
Aluminum bronze	C95400	4 Fe, 11 Al	As cast	586 (85)	241 (35)	18	Bearings, gears, worms, bushings, valve seats and guards, pickling hooks

^a The balance of the composition is copper.

Source: Adapted from *ASM Handbook*, Vol. 2, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.

Table 12.7 Compositions, Mechanical Properties, and Typical Applications for Several Common Aluminum Alloys

Aluminum Association Number	UNS Number	Composition (wt%)*	Condition (Temper Designation)	Mechanical Properties			Typical Applications/ Characteristics
				Tensile Strength [MPa (ksi)]	Yield Strength [MPa (ksi)]	Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]	
Wrought, Nonheat-Treatable Alloys							
1100	A91100	0.12 Cu	Annealed (O)	90 (13)	35 (5)	35-45	Food/chemical handling & storage equipment, heat exchangers, light reflectors
3003	A93003	0.12 Cu, 1.2 Mn, 0.1 Zn	Annealed (O)	110 (16)	40 (6)	30-40	Cooking utensils, pressure vessels and piping
5052	A95052	2.5 Mg, 0.25 Cr	Strain Hardened (H32)	230 (33)	195 (28)	12-18	Aircraft fuel & oil lines, fuel tanks, appliances, rivets, and wire
Wrought, Heat-Treatable Alloys							
2024	A92024	4.4 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn	Heat treated (T4)	470 (68)	325 (47)	20	Aircraft structures, rivets, truck wheels, screw machine products
6061	A96061	1.0 Mg, 0.6 Si, 0.30 Cu, 0.20 Cr	Heat treated (T4)	240 (35)	145 (21)	22-25	Trucks, canoes, railroad cars, furniture, pipelines
7075	A97075	5.6 Zn, 2.5 Mg, 1.6 Cu, 0.23 Cr	Heat treated (T6)	570 (83)	505 (73)	11	Aircraft structural parts and other highly stressed applications
Cast, Heat-Treatable Alloys							
295.0	A02950	4.5 Cu, 1.1 Si	Heat treated (T4)	221 (32)	110 (16)	8.5	Flywheel and rear-axle housings, bus and aircraft wheels, crankcases
356.0	A03560	7.0 Si, 0.3 Mg	Heat treated (T6)	228 (33)	164 (24)	3.5	Aircraft pump parts, automotive transmission cases, water-cooled cylinder blocks
Aluminum-Lithium Alloys							
2090	—	2.7 Cu, 0.25 Mg, 2.25 Li, 0.12 Zr	Heat treated, cold worked (T83)	455 (66)	455 (66)	5	Aircraft structures and cryogenic tankage structures
8090	—	1.3 Cu, 0.95 Mg, 2.0 Li, 0.1 Zr	Heat treated, cold worked (T651)	465 (67)	360 (52)	—	Aircraft structures that must be highly damage tolerant

*The balance of the composition is aluminum.

Source: Adapted from *ASM Handbook, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 1990. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.

Soal-soal

1. Sebutkanlah keuntungan-keuntungan dan kerugian-kerugian dari pengerjaan panas dan pengerjaan dingin.
2. a. Sebutkanlah keuntungan-keuntungan dari pembentukan logam dengan cara ekstrusi dibandingkan dengan pengerolan.
b. Sebutkan juga kerugian-kerugiannya.
3. a. Sebutkan empat buah klasifikasi dari baja.
b. Untuk masing-masingnya, jelaskan dengan ringkas sifat-sifatnya dan aplikasinya.
4. Apakah fungsi dari elemen pemuatan pada baja perkakas/*tools*.
5. Dilihat dari struktur mikro, jelaskanlah mengapa besi tuang kelabu rapuh dan lemah dalam tarikan.
6. Bandingkanlah antara besi tuang putih dan besi tuang nodular dalam hal: (a) komposisi dan perlakuan panas, (b) struktur mikro, dan (c) karakteristik mekanik.

BAB IX

LOGAM NON-FEROUS

Sifat-sifat serta struktur kelompok logam non-besi yang berbeda akan mempunyai harga yang jauh berbeda. Contohnya, temperatur leleh, bervariasi dari temperatur ruang untuk logam galium hingga lebih dari 3000^oC untuk wolfram. Kekuatan bervariasi mulai dari 5 MN.m⁻² hingga lebih dari 1.500 MN/m². Aluminium, magnesium dan beryllium (logam ringan) mempunyai kerapatan yang sangat rendah, sedangkan timbal dan wolfram mempunyai kerapatan yang sangat tinggi.

Pada banyak aplikasi, berat merupakan faktor yang kritis. Untuk menghubungkan kekuatan material dengan beratnya, yang dikenal dengan kekuatan spesifik atau rasio kekuatan terhadap berat, didefinisikan dengan:

$$\text{Kekuatan spesifik} = \frac{\text{kekuatan}}{\text{kerapatan}}$$

Tabel 1 menampilkan perbandingan kekuatan spesifik dari beberapa paduan non-besi kekuatan tinggi.

Faktor lainnya dalam desain yang berkaitan dengan logam non-besi adalah biaya, yang juga bisa berbeda dengan sangat berarti.

Tabel 1. Kekuatan spesifik paduan non-besi.

<i>Logam</i>	<i>Kerapatan (Mg.m⁻³)</i>	<i>Kekuatan Tarik (MN.m⁻²)</i>	<i>Kekuatan Tarik Spesifik (m²s⁻²)</i>
Aluminium	2,70	570	211000
Beryllium	1,85	380	205000
Tembaga	8,93	1300	146000
Timbal	11,36	70	6000
Magnesium	1,74	380	218000
Nikel	8,90	1360	153000
Titanium	4,51	1350	299000
Wolfram	19,25	1030	54000
Seng	7,13	520	73000
Besi	7,87	2070	263000

PADUAN ALUMINIUM

Aluminium adalah logam kedua terbanyak di bumi. Aluminium digunakan di jutaan aplikasi, diantaranya kaleng minuman, alat rumah tangga, peralatan pemrosesan kimia, peralatan transmisi daya listrik, komponen otomotif dan komponen pesawat ruang angkasa.

Sifat-sifat Aluminium

Aluminium mempunyai kerapatan $2,70 \text{ Mg.m}^{-3}$ atau sepertiga kerapatan baja, dan modulus elastisitas sebesar 70 GN.m^{-2} . Walaupun paduan aluminium mempunyai sifat tarik yang rendah bila dibandingkan dengan baja, kekuatan spesifiknya sangat baik. Aluminium sering digunakan ketika berat merupakan faktor penting, seperti di pesawat terbang dan otomotif.

Aluminium juga bisa berespon terhadap mekanisme penguatan. Tabel 2 membandingkan kekuatan aluminium dianil murni dengan paduan aluminium yang diperkuat dengan berbagai teknik. Paduan aluminium bisa mempunyai kekuatan 30 kali lebih besar dari aluminium murni.

Tabel 2. Efek mekanisme penguatan pada aluminium dan paduan aluminium.

<i>Material</i>	<i>Kekuatan tarik (MN.m⁻²)</i>	<i>Kekuatan luluh (MN.m⁻²)</i>	<i>% elongasi</i>	<i>Kekuatan luluh(paduan)</i>
				<i>Kekuatan luluh(murni)</i>
Al murni (99,999% Al)	45	17	60	
Al murni komersial (99% Al)	90	35	45	2,0
Paduan Al diperkuat larutan-jenuh (Al, 1,2% Mn)	110	41	35	2,4
Al diperkuat 75% pengerjaan dingin (99% I)	165	152	15	8,8
Paduan Al diperkuat dispersi (Al, 5% Mg)	290	152	35	8,8
Paduan Al diperkeras penuaan (aging) (Al, 5,6% Zn, 2,5% Mg)	572	503	11	29,2

Sifat fisik yang menguntungkan dari aluminium diantaranya konduktivitas listrik dan termal, sifat nonmagnetik (para magnetik) dan ketahanan yang baik terhadap oksidasi dan korosi. Aluminium akan bereaksi dengan oksigen, bahkan pada temperatur ruang, membentuk lapisan sangat tipis aluminium oksida (Al_2O_3) yang akan melindungi lapisan dibawahnya dari lingkungan yang korosif.

Aluminium tidak menunjukkan batas fatigue yang tinggi, sehingga kerusakan bisa terjadi pada tegangan rendah. Karena temperatur lelehnya yang rendah, aluminium

tidak cocok digunakan pada temperatur tinggi. Terakhir, paduan aluminium mempunyai kekerasan rendah, sehingga mengakibatkan tahanan aus yang rendah.

Contoh soal

Kabel baja berdiameter 12,5 mm mempunyai kekuatan luluh 310 MN/m². Kerapatan baja kira-kira 7,87 Mg/m³. Berdasarkan data pada tabel 5, carilah: (a) beban maksimum yang bisa ditahan oleh kabel baja. (b) Diameter paduan aluminium-manganes(3004-H18) yang diperlukan untuk menahan beban yang sama dengan baja, dan (c) berat kabel baja per meter versus kabel paduan aluminium.

Jawab

a. Beban = $F = \sigma_y A = 310 (\pi/4) (0,0125)^2 = 0,038 \text{ MN} = 38 \text{ kN}$

b. Kekuatan luluh paduan aluminium adalah 250 MN/m², sehingga:

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{F}{\sigma_y} = \frac{0,038}{250} = 1,52 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$d = 0,0139 \text{ m} = 13,9 \text{ mm}$$

c. Kerapatan baja = $\rho = 7,87 \text{ Mg/m}^3$

kerapatan aluminium = $\rho = 2,70 \text{ Mg/m}^3$

$$\text{Berat 1 m baja} = A/\rho = \frac{\pi}{4} (0,0125)^2 (1) (7,87) = 9,66 \times 10^{-4} \text{ Mg} = 0,966 \text{ kg}$$

$$\text{Berat 1 m aluminium} = A/\rho = \frac{\pi}{4} (0,0139)^2 (1) (2,70) = 4 \times 10^{-4} \text{ Mg} = 0,410 \text{ kg}$$

Walaupun kekuatan luluh aluminium lebih rendah dari baja dan diameter kabelnya berukuran lebih besar, berat kabel aluminium kurang dari setengah berat kabel baja.

Penandaan

Paduan aluminium bisa dibagi atas dua kelompok utama: paduan tempa dan cor, tergantung kepada metode pabrikasinya. Paduan tempa, yang dibentuk dengan deformasi plastis (pengerjaan panas atau dingin), mempunyai komposisi dan struktur mikro yang berbeda sekali dengan paduan cor. Disetiap kelompok utama, paduan dikelompokkan atas dua subkelompok: paduan yang bisa diberi perlakuan panas (heat-treatable) dan yang tidak bisa diberi perlakuan panas (nonheat-treatable).

Paduan aluminium diberi tanda dengan sistem penomoran seperti yang ditunjukkan oleh tabel 3. Nomor pertama menunjukkan unsur pepadu utama, dan nomor selanjutnya mengacu kepada komposisi spesifik paduan. Sistem penomoran IADS ini (International Alloy Designation System) telah banyak diadopsi oleh berbagai negara.

Tabel 3. Sistem Penandaan IADS (International Alloy Designation System) untuk paduan aluminium.

Paduan Tempa :

1xxx	Al murni komersial (>99% Al)	Tidak bisa di <i>aging</i>
2xxx	Al-Cu dan Al-Cu-Li	Bisa di <i>aging</i>
3xxx	Al-Mn	Tidak bisa di <i>aging</i>
4xxx	Al-Si dan Al-Mg-Si	Bisa di <i>aging</i> jika mengandung Mg
5xxx	Al-Mg	Tidak bisa di <i>aging</i>
6xxx	Al-Mg-Si	Bisa di <i>aging</i>
7xxx	Al-Mg-Zn	Bisa di <i>aging</i>
8xxx	Al-Li, Sn, Zr, B, Fe atau Cr	Sebagian besar bisa di <i>aging</i>

Paduan Cor :

1xx	Al murni komersial	Tidak bisa di <i>aging</i>
2xx	Al-Cu	Bisa di <i>aging</i>
3xx	Al-Si-Cu atau Al-Mg-Si	Beberapa bisa di <i>aging</i>
4xx	Al-Si	Tidak bisa di <i>aging</i>
5xx	Al-Mg	Tidak bisa di <i>aging</i>
7xx	Al-Mg-Zn	Bisa di <i>aging</i>
8xx	Al-Sn	Bisa di <i>aging</i>

Derajat penguatan diberikan oleh penandaan temper T atau H, tergantung apakah paduan di beri perlakuan panas atau pengerasan regangan (tabel 4). Penandaan lainnya adalah apakah paduan dianil (O), perlakuan larutan (W) atau digunakan seperti kondisi pabrikasi (F). Angka yang mengikuti T atau H menunjukkan jumlah pengerasan regangan, jenis perlakuan panas, atau aspek khusus lainnya pada pemrosesan paduan. Paduan yang umum dan sifat-sifatnya ditunjukkan oleh tabel 5.

Tabel 4. Penandaan temper paduan aluminium.

F	Sebagaimana pabrikasi (pengerjaan panas, tempa, cor dsb.
O	Dianil (pada kondisi paling lunak yang mungkin)
H	Pengerjaan dingin
	H1x – hanya pengerjaan dingin. (x merupakan jumlah pengerjaan dingin dan penguatan
	H12 – pengerjaan dingin yang memberikan kekuatan tarik ditengah-tengah antara temper O dan H14.
	H14 - pengerjaan dingin yang memberikan kekuatan tarik ditengah-tengah antara temper O dan H18.
	H16 - pengerjaan dingin yang memberikan kekuatan tarik ditengah-tengah antara temper H14 dan H18.
	H18 – pengerjaan dingin yang memberikan kira-kira 75% reduksi.
	H19 – pengerjaan dingin yang memberikan kekuatan tarik minimal 15 MN.m-2 lebih besar dari yang diperoleh oleh temper H18.
	H2x – pengerjaan dingin dan sebagian dianil.
	H3x – pengerjaan dingin dan distabilkan pada temperatur rendah untruk mencegah pengerasan penuaan (<i>aging</i>) pada struktur.
W	Perlakuan larutan

- T Pengerasan penuaan
 T1 – didinginkan dari suhu pabrikasi dan *diaging* secara alami
 T2 – didinginkan dari suhu pabrikasi, pengerjaan dingin dan *diaging* secara alami
 T3 – perlakuan larutan, pengerjaan dingin, dan *diaging* secara alami
 T4 - perlakuan larutan, dan *diaging* secara alami
 T5 – didinginkan dari suhu pabrikasi dan *diaging* secara artifisial.
 T6 - perlakuan larutan, dan *diaging* secara artifisial.
 T7 - perlakuan larutan dan distabilkan dengan *overaging*.
 T8 - perlakuan larutan, pengerjaan dingin, dan *diaging* secara artifisial.
 T9 - perlakuan larutan, *diaging* secara artifisial, dan pengerjaan dingin.
 T10 – didinginkan dari suhu pabrikasi, pengerjaan dingin dan *diaging* secara artifisial.

Tabel 5. Sifat-sifat umum paduan aluminium

<i>Paduan</i>		<i>Kekuatan Tarik</i> (MN.m ⁻²)	<i>Kekuatan Luluh</i> (MN.m ⁻²)	<i>% Elongasi</i>	<i>Aplikasi</i>
Paduan tempa nonheat-treatable					
1100-O	>99% Al	90	35	40	} Komponen listrik, foil Proses makanan
1100-H18		165	150	10	
3004-O	1,2% Mn-1,0% Mg	180	70	25	} Kaleng minuman, penggunaan arsitek
3004-H18		285	250	9	
4043-O	5,2% Si	145	70	22	} Logam pengisi las
4043-H18		285	270	1	
5182-O	4,5% Mg	290	130	25	} Tutup kaleng minuman Komponen kapal
5182-H19		420	395	4	
Paduan tempa heat-treatable					
2024-T4	4,4% Cu	470	325	20	Roda truk
2090-T6	2,4% Li-2,7% Cu	550	517	6	Kulit pesawat udara
4032-T6	12% Si-1% Mg	380	30	9	Piston
6061-T6	1% Mg-0,6% Si	310	275	15	Cano, gerbon kereta api
7075-T6	5,6% Zn-2,5% Mg	570	505	11	Rangka pesawat udara
Paduan cor					
201-T6	4,5% Cu	485	435	7	Rumah transmisi
319-F	6% Si-3,5% Cu	185	125	2	Pengecoran umum
356-T6	7% Si-0,3% Mg	230	165	3	Fitting pesawat udara
380-F	8,5% Si-3,5% Cu	315	160	3	Rumah motor
390-F	17% Si-4,5% Cu	285	240	1	Mesin otomotif
443-F	5,2% Si (cor pasir)	130	55	8	Peralatan penanganan makanan, fitting kapal
	mould permanen	160	60	10	
	die cast	230	110	9	

Paduan Tempa. Paduan tempa 1xxx, 3xxx, 5xxx dan sebagian besar 4xxx tidak bisa diberi perlakuan panas. Paduan 1xxx dan 3xxx adalah paduan fasa tunggal, kecuali ada sejumlah kecil inklusi atau senyawa antar logam (Gambar 13.2). Sifat-sifat paduan ini dikontrol oleh pengerasan regangan, penguatan larutan jenuh dan pengontrolan besar

butir. Namun kelarutan elemen pepadu pada aluminium rendah pada temperatur ruang, maka derajat penguatan larutan jenuh terbatas.

Paduan Cor. Banyak paduan cor aluminium yang ditunjukkan oleh tabel 5 mengandung cukup silikon untuk menyebabkan reaksi eutektik, sehingga membuat paduan mempunyai titik leleh rendah, fluiditas baik, dan kemampuan cor yang baik. Fluiditas adalah kemampuan logam cair untuk mengalir melalui cetakan tanpa pembekuan lebih awal, dan kemampuan cor adalah berhubungan dengan kemudahan dimana benda cor yang baik bisa dibuat dari paduan.

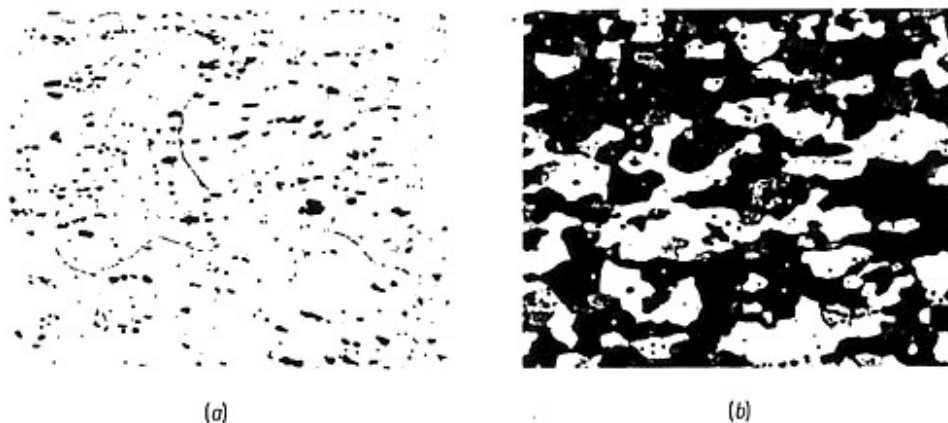


Figure 13.2
(a) FeAl_3 inclusions in annealed 1100 aluminium ($\times 350$). (b) Mg_2Si precipitates in annealed 5457 aluminium alloy ($\times 75$). (From Metals Handbook, Vol. 7, 8th Ed., American Society for Metals, 1972.)

Paduan Aluminium Lanjut. Sejumlah peningkatan terhadap paduan aluminium konvensional dan metode pabrikasi telah meningkatkan kegunaan logam ini. Paduan yang mengandung litium telah dibuat, khususnya untuk industri pesawat udara. Litium mempunyai kerapatan $0,534 \text{ Mg/m}^3$, sehingga kerapatan paduan Al-Li 10% lebih kecil dari paduan aluminium konvensional (Gambar 13.5). Modulus elastisitas meningkat, dan kekuatan bisa sama atau melebihi paduan konvensional (lihat paduan 2090 pada tabel 5). Kerapatan yang rendah membuat kekuatan spesifik sangat bagus sekali dan peningkatan kekakuan spesifik lebih besar sehingga membuat paduan ini sangat disukai dalam penggunaan struktur pesawat udara. Paduan ini mempunyai laju pertumbuhan retak fatigue rendah, sehingga meningkatkan ketahanan fatigue, dan mempunyai ketangguhan yang baik pada temperatur *kriogenik*. Al-Li juga digunakan pada rantai, kulit dan rangka pesawat militer dan komersial.

Kekuatan tinggi paduan Al-Li adalah akibat pengersan penuaan (Gambar 13.6). Paduan yang mengandung sampai 2,5% Li bisa diberi perlakuan panas dengan metode

konvensional. Penambahan Li (hingga 4%) bisa dilakukan dengan proses pembekuan cepat, yang akan menurunkan berat paduan dan menaikkan kekuatan.

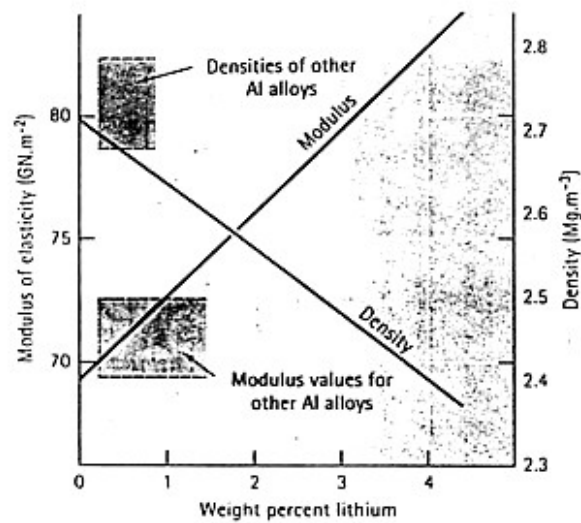


Figure 13.5
The effect of lithium on the stiffness and density of aluminium alloys.

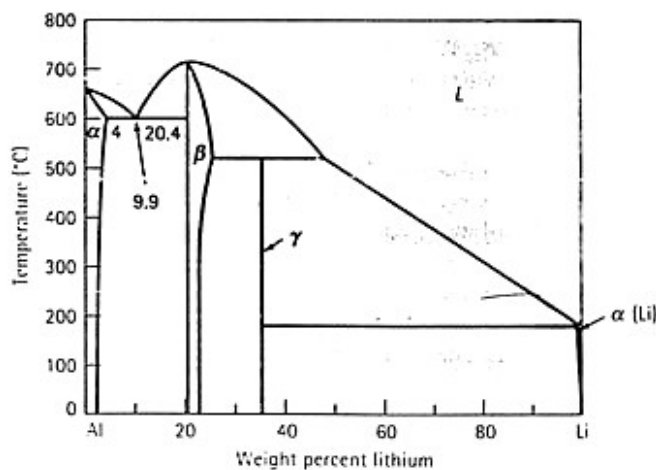


Figure 13.6
The aluminium-lithium phase diagram.

Contoh soal

Pilihlah metode untuk daur ulang paduan aluminium yang digunakan untuk kaleng minuman.

Jawab

Daur ulang aluminium memiliki keuntungan sebab diperlukan energi yang kecil untuk membuat aluminium dari Al_2O_3 . Namun mendaur ulang kaleng minuman mempunyai beberapa kesulitan.

Kaleng minuman terbuat dari dua paduan aluminium yang mempunyai perbedaan komposisi (tabel 5) (3004 untuk bagian badannya, dan 5182 untuk penutupnya). Paduan 3004 mempunyai mampu bentuk yang baik untuk proses tarikan. Paduan 5182

lebih keras dan membuat tariakan ke atas dapat berfungsi dengan baik. Ketika kaleng dicairkan, paduan hasilnya mengandung Mg dan Mn dan tidak cocok untuk aplikasi apapun.

Satu pendekatan untuk mendaur ulang kaleng adalah dengan kedua bahan kaleng ini. Kaleng dirobek, kemudian dipanaskan untuk membuang lapisan pernis yang berfungsi melindungi kaleng selama pemakaian. Kita bisa selanjutnya merobek bahan pada temperatur dimana paduan 5182 mulai mencair. Paduan 5182 mempunyai jangkauan pembekuan yang lebih lebar dari paduan 3004 dan pecah menjadi potongan-potongan kecil. Paduan 3004 lebih ulet dan robek dalam ukuran yang lebih besar. Kepingan paduan 5182 dapat dipisahkan dengan melewatkannya melalui sarinan. Kedua paduan yang sudah terpisah kemudian dilebur, dicor dan dirol ke bentuk kaleng yang baru.

Metode alternatif adalah dengan melumerkan kaleng. Ketika kaleng sudah cair, kita alirkan khlorida ke cairan paduan. Khlorine akan bereaksi dengan magnesium, dan melepaskannya dalam bentuk khlorida. Cairan sisa dapat diatur komposisinya dan didaur ulang menjadi paduan 3004.

PADUAN MAGNESIUM

Magnesium, dimana sering diekstraksi secara elektrolitik dari magnesium klorida yang terkonsentrasi di air laut, adalah lebih ringan dari aluminium, dengan kerapatan $1,74 \text{ Mg/m}^3$, dan meleleh pada temperatur sedikit lebih rendah dari aluminium (650°C). Di banyak lingkungan, tahanan korosi magnesium mendekati aluminium, namun jika berada di lingkungan yang mengandung garam, seperti dekat laut, akan menyebabkan penguraian yang cepat. Walaupun paduan magnesium tidak sekuat paduan aluminium, kekuatan spesifiknya hampir sama. Oleh sebab itu paduan magnesium digunakan di aplikasi pesawat udara, mesin kecepatan tinggi, peralatan transportasi dan peralatan penanganan material.

Magnesium mempunyai modulus elastisitas rendah (45 GN/m^2) dan ketahanan fatigue, creep dan aus yang rendah. Magnesium juga berbahaya selama pekerjaan pengecoran atau pemesinan, karena bisa bereaksi dengan mudah dengan oksigen dan terbakar. Respon magnesium terhadap mekanisme kekuatan juga rendah.

Struktur dan Sifat. Magnesium murni mempunyai struktur HCP dan keuletannya lebih rendah dari aluminium. Namun paduan magnesium mempunyai keuletan karena unsur padu meningkatkan jumlah bidang *slip* aktif. Beberapa deformasi dan pengerasan regangan bisa dilakukan pada temperatur ruang, dan paduan bisa dideformasi pada suhu tinggi. Pengerasan regangan menghasilkan pengaruh yang

relatif kecil pada magnesium murni karena koefisien pengerasan regangan yang rendah.

Sebagaimana pada paduan aluminium, kelarutan elemen pepadu pada magnesium pada temperatur ruang terbatas, menyebabkan hanya sejumlah kecil derajat penguatan larutan jenuh. Namun kelarutan banyak elemen pepadu meningkat terhadap temperatur, sebagaimana terlihat pada diagram fasa Mg-Al (gambar 13.8). Karenanya paduan bisa diperkuat dengan penguatan dispersi atau pengerasan penuaan. Beberapa paduan magnesium pengerasan penuaan, seperti paduan yang mengandung elemen Zr, Th, Ag, atau Ce, mempunyai ketahanan yang baik terhadap *overageing* pada temperatur sampai 300°C. Paduan yang mengandung hingga 9% Li mempunyai berat yang sangat ringan. Sifat-sifat paduan magnesium ditabulasikan di tabel 6. Sistem penomoran dibuat oleh "American Society for Testing Materials" (ASTM) dan telah diadopsi oleh banyak negara.

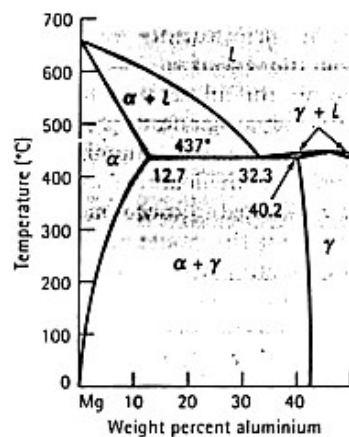


Figure 13.8
The magnesium-aluminium phase diagram.

Tabel 6. Sifat-sifat paduan magnesium pada umumnya.

<i>Paduan (Penomoran ASTM)</i>	<i>Komposisi</i>	<i>Kekuatan Tarik (MN.m⁻²)</i>	<i>Kekuatan Luluh (MN.m⁻²)</i>	<i>% Elongasi</i>
Mg Murni:				
Dianil		160	90	3-15
Pengerjaan dingin		180	115	2-10
Paduan Cor:				
AM100-T6	10% Al-0,1% Mn	275	150	1
AZ81A-T4	7,6% Al-0,7% Zn	275	85	15
ZK61A-T6	6% Zn-0,7% Zr	310	195	10
Paduan Tempa:				
AZ80A-T5	8,5% Al-0,5% Zn	380	25	7
ZK40A-T5	4% Zn-0,45% Zr	275	255	4
HK31A-H24	3% Th-0,6% Zr	260	205	8

Paduan magnesium lanjut termasuk diantaranya paduan dengan impuritas rendah dan paduan yang mengandung sejumlah besar (>5%) cerium dan unsur bumi jarang lainnya. Paduan ini membentuk lapisan tipis pelindung MgO yang meningkatkan ketahanan korosi. Proses pembekuan yang cepat akan bisa membuat penyerapan elemen padu lebih banyak ke magnesium, sehingga akan meningkatkan tahanan korosi. Peningkatan kekuatan, terutama pada temperatur tinggi, bisa didapatkan dengan memasukkan partikel keramik atau serat seperti silikon karbida ke dalam logam.

PADUAN TEMBAGA

Paduan berbasis tembaga lebih berat dari besi. Walaupun kekuatan luluh beberapa paduan tinggi, kekuatan spesifiknya umumnya lebih rendah dari paduan aluminium atau magnesium. Paduan mempunyai ketahanan fatigue, creep dan aus lebih baik dari paduan ringan aluminium atau magnesium. Banyak paduan mempunyai keuletan, ketahanan korosi dan konduktivitas listrik dan termal yang baik dan sebagian besar bisa disambung atau dipabrikasi kedalam bentuk yang berguna. Aplikasi paduan berbasis tembaga antara lain: komponen listrik (seperti kabel), pompa, katup, dan komponen *plumbing*.

Paduan tembaga juga tidak seperti logam biasa dimana paduan ini bisa dipilih untuk menghasilkan warna dekoratif yang tepat. Tembaga murni berwarna merah, penambahan seng akan menghasilkan warna kuning, dan penambahan nikel menghasilkan warna perak. Paduan tembaga bisa diperkuat dengan semua mekanisme penguatan yang kita kenal. Pengaruh mekanisme penguatan terhadap sifat mekanik bisa dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Sifat-sifat paduan tembaga umum yang diperoleh dengan mekanisme penguatan yang berbeda.

<i>Material</i>	<i>Kekuatan Tarik (MN.m⁻²)</i>	<i>Kekuatan Luluh (Mn.m⁻²)</i>	<i>% Elongasi</i>	<i>Mekanisme Penguatan</i>
Cu murni, dianil	210	35	60	
Cu murni komersial, Dianil untuk mendapatkan butir kasar	220	70	55	
Cu murni komersial, Dianil untuk mendapatkan butir halus	235	75	55	Ukuran butir
Cu murni komersial, Pengerjaan dingin 70%	395	365	4	Strain hardening
Cu-35%Zn, dianil	325	105	62	Solid solution
Cu-10%Sn, dianil	455	195	68	Solid solution
Cu-35%Zn, pengerjaan dingin	675	435	3	Solid solution +

Cu-2% Be, pengerasan penuaan	1310	1205	4	Strain hardening Age-hardening
Cu-Al di quench dan temper	760	415	5	Martensitic reaction
Perunggu mangan cor	490	195	30	Eutectoid reaction

Tembaga yang mengandung impuritas kurang dari 1% digunakan untuk aplikasi dibidang kelistrikan. Sejumlah kecil cadmium, peral dan Al_2O_3 meningkatkan kekerasan tanpa mempengaruhi konduktivitas dengan berarti. Paduan tembaga fasa tunggal diperkuat dengan pengerjaan dingin. Tembaga FCC mempunyai keuletan yang sangat baik dan koefisien pengerasan regangan yang tinggi.

Paduan Tembaga Timbal. Umumnya paduan tembaga tempa bisa mengandung timbal (Pb) hingga 4,5%. Timbal membentuk reaksi monotektik dengan tembaga dan menghasilkan bola timbal kecil karena paling akhir membeku. Timbal akan menaikkan karakteristik pemesinan. Bahkan jumlah timbal yang lebih besar digunakan pada pengecoran tembaga, dimana timbal memberikan kemampuan pelumasan dan daya rekat, dengan cara partikel keras lekat ke bola timbal lunak, dan karenanya mengurangi keausan.

NIKEL DAN COBALT

Paduan nikel dan cobalt banyak digunakan untuk proteksi karat dan lingkungan temperatur tinggi, karena logam ini mempunyai titik leleh yang tinggi dan kekuatan yang tinggi. Nikel mempunyai struktur kristal FCC dan mempunyai kemampuan pembentukan yang tinggi, cobalt mempunyai struktur FCC diatas $417^{\circ}C$ dan struktur HCP pada temperatur ruang. Paduan nikel dan cobalt umum bisa dilihat pada tabel 8.

Tabel 8. Komposisi, sifat dan aplikasi beberapa paduan nikel dan cobalt.

<i>Material</i>	<i>Kekuatan Tarik (MN.m⁻²)</i>	<i>Kekuatan Luluh (Mn.m⁻²)</i>	<i>% Elongasi</i>	<i>Mekanisme Penguatan</i>	<i>Aplikasi</i>
Ni murni (99,9% Ni)	345 655	110 620	45 4	Danil Pengerjaan dingin	Corrosion resistance Corrosion resistance
Ni-Cu alloy: Monel 400 (Ni-31,5%Cu)	540	270	37	Danil	Katup, pompa, heat Exchanger
Monel K-500 (Ni-29,5% Cu- 2,7%Al-0,6%Ti)	1030	760	30	di-aging	Poros, pegas, Impeller
Ni Superalloy Inconel 600 (Ni-15,5% Cr- 8%Fe)	620	200	49	karbida	Peralatan perlakuan Panas

Hastelloy B-2 (Ni-28% Mo)	900	415	61	karbida	Corrosion resistance
DS-Ni (Ni-2% ThO ₂)	490	330	14	dispersi	Turbin gas
Fe-Ni superalloy: Incoloy 800 (Ni-46% Fe- 1%Cr)	615	258	37	karbida	Heat exchanger
Co Superalloy: Stellite 6B (60%Co- 30%Cr-4,5%W)	1220	710	4	karbida	Abrasive wear resistance

Nikel dan Monel. Nikel dan paduannya mempunyai ketahanan korosi dan karakteristik pembentukan yang sangat baik. Jika tembaga ditambahkan kedalam nikel, kekuatan maksimum yang diperoleh mendekati 60% kekuatan Ni. Sejumlah paduan, disebut *monel*, dengan komposisi sekitar angka tersebut karena kekuatan dan ketahanan korosinya digunakan di air asin dan pada temperatur tinggi. Beberapa monel mengandung aluminium dan titanium. Paduan-paduan ini menunjukkan respon pengerasan penuaan dengan presipitasi γ , dimana Ni₃Al atau Ni₃Ti berpresipitasi yang akan menggandakan kekuatan tarikannya.

Beberapa sifat khusus bisa didapatkan pada paduan nikel. Nikel bisa digunakan untuk menghasilkan magnet permanen karena sifat ferromagnetiknya. Paduan Ni-36% Fe (Invar) menunjukkan gejala tanpa ekspansi selama pemanasan; efek ini digunakan untuk menghasilkan material komposit bimetal.

Superalloy. Superalloy (paduan super) adalah nikel, besi-nikel, dan paduan cobalt yang mengandung sejumlah besar elemen pepadu yang dimaksudkan untuk menghasilkan kekuatan tinggi pada temperatur tinggi, tahan creep pada temperatur mencapai 1000°C, dan tahan korosi. Sifat yang baik pada temperatur tinggi ini didapatkan walaupun temperatur lelehnya kira-kira sama dengan baja. Aplikasi umum adalah sudu untuk turbin dan mesin jet, heat exchanger, komponen bejana untuk reaksi kimia, dan peralatan perlakuan panas.

Untuk mendapatkan kekuatan tinggi dan ketahanan creep, elemen pepadu harus menghasilkan struktur mikro yang kuat dan stabil pada temperatur tinggi. Penguatan yang umumnya dilakukan adalah penguatan larutan padat, penguatan dispersi dan pengerasan presipitasi.

PADUAN TITANIUM

Titanium mempunyai sifat yang baik pada temperatur tinggi, tahan korosi, dan kekuatan spesifik tinggi. Kekuatannya mencapai 1400 MN/m², dan kerapatan 4,505

Mg/m³. Disamping itu, lapisan pelindung TiO₂ memberikan kekuatan yang baik terhadap korosi dan kontaminasi dibawah suhu 535°C.

Sifat tahan korosi yang baik dimanfaatkan untuk aplikasi di peralatan pemrosesan kimia, komponen kapal, dan implan biomedical. Juga digunakan untuk bahan pesawat udara seperti rangka pesawat dan komponen mesin jet. Jika dikombinasikan dengan niobium, dihasilkan senyawa *superconductive intermetallic*. Titanium juga sering dikombinasikan dengan nikel atau aluminium.

Titanium Murni Komersial. Titanium tanpa paduan digunakan dalam hal ketahanan korosinya. Impuritas, seperti oksigen meningkatkan kekuatan titanium tetapi menurunkan ketahanan korosinya. Penggunaannya meliputi: heat exchanger, pipa, reaktor, pompa dan katup untuk industri kimia dan petrokimia.

Paduan Titanium Alpha. Paduan umum paduan alpha mengandung 5% Al dan 2,5% Sn. Paduan alpha yang dianil ke temperatur tinggi di daerah β , pendinginan cepat akan menghasilkan struktur butir α Widmanstatten dan menghasilkan ketahanan yang baik terhadap fatigue. Pendinginan di dapur akan menghasilkan struktur α seperti pelat yang memberikan ketahanan yang elbih baik terhadap creep.

Paduan Titanium Beta. Walaupun penambahan sejumlah besar vanadium atau molybdenum akan menghasilkan struktur β secara keseluruhan pada temperatur ruang, tidak ada paduan beta yang memadu pada kondisi ini. Namun sebenarnya paduan ini kaya akan *stabilizer* β , sehingga pendinginan cepat akan menghasilkan struktur meta stabil yang terdiri semuanya dari β . Penguatan diperoleh dengan sejumlah besar elemen pemadu penguatan larutan jenuh dan dengan proses penuaan (aging) sturuktur β meta stabil yang akan membentuk presipitasi alpha. Aplikasi logam ini antara lain: *fastener* kekuatan tinggi, *beam*, dan *fitting* untuk penggunaan di pesawat antariksa.

Paduan Titanium Alpha-Beta. Dengan keseimbangan yang tepat dari *stabilizer* α dan β , campuran α dan β diperoleh pada temperatur ruang. Ti-6% Al-4% V adalah contohnya. Karena paduan mengandung dua fasa, perlakuan panas bisa digunakan untuk mengontrol struktur mikro dan sifat-sifatnya.

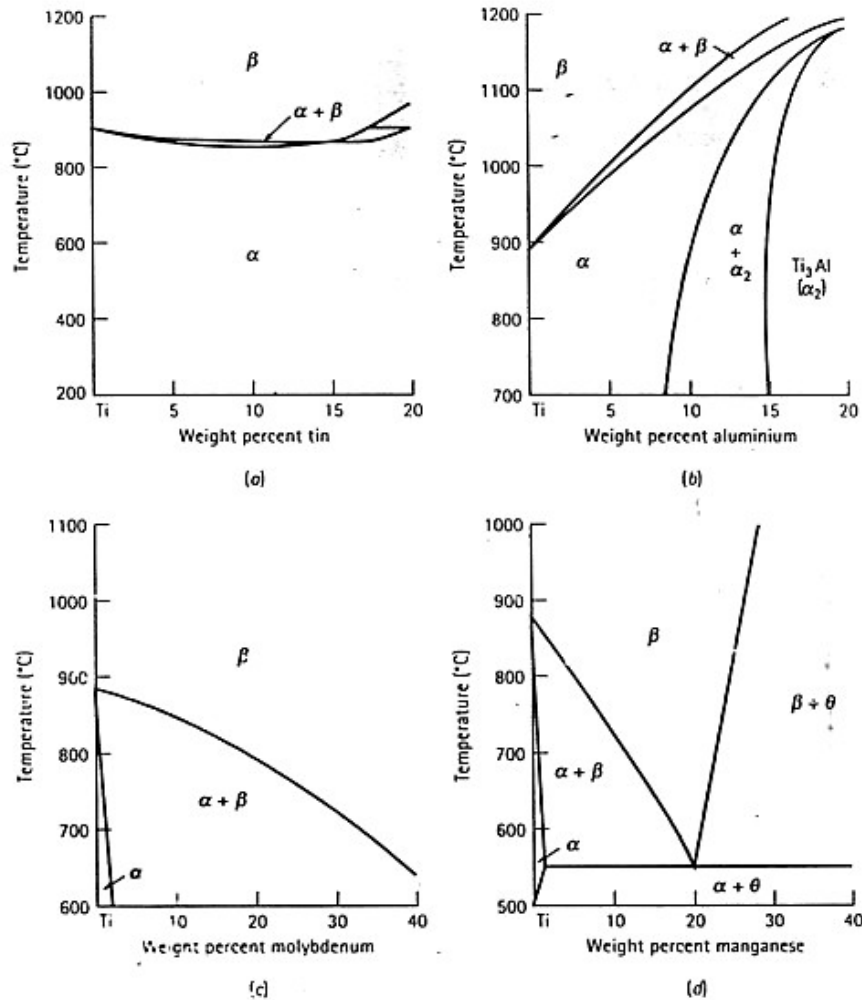


Figure 13.15
Portions of the phase diagrams for (a) titanium-tin, (b) titanium-aluminium, (c) titanium-molybdenum, and (d) titanium-manganese.

Proses anil akan memberikan keuletan tinggi, sifat yang seragam dan kekuatan yang baik. Paduan dipanaskan sedikit dibawah garis temperatur β , menghasilkan sejumlah kecil α yang tak berubah dan mencegah pertumbuhan butir (gambar 13.18). Pendinginan lambat akan menghasilkan butir α *equiaxed*; dimana struktur *equiaxed* akan memberikan sifat keuletan yang baik dan kemampu bentukan sehingga sulit bagi retak fatigue untuk terbentuk. Pendinginan cepat akan menghasilkan fasa alpha berbentuk tenunan keranjang (basketweave) (gambar 13.18c). Kondisi ini akan menghasilkan laju pertumbuhan retak fatigue yang lambat, ketangguhan patah yang baik dan ketahanan yang baik terhadap creep.

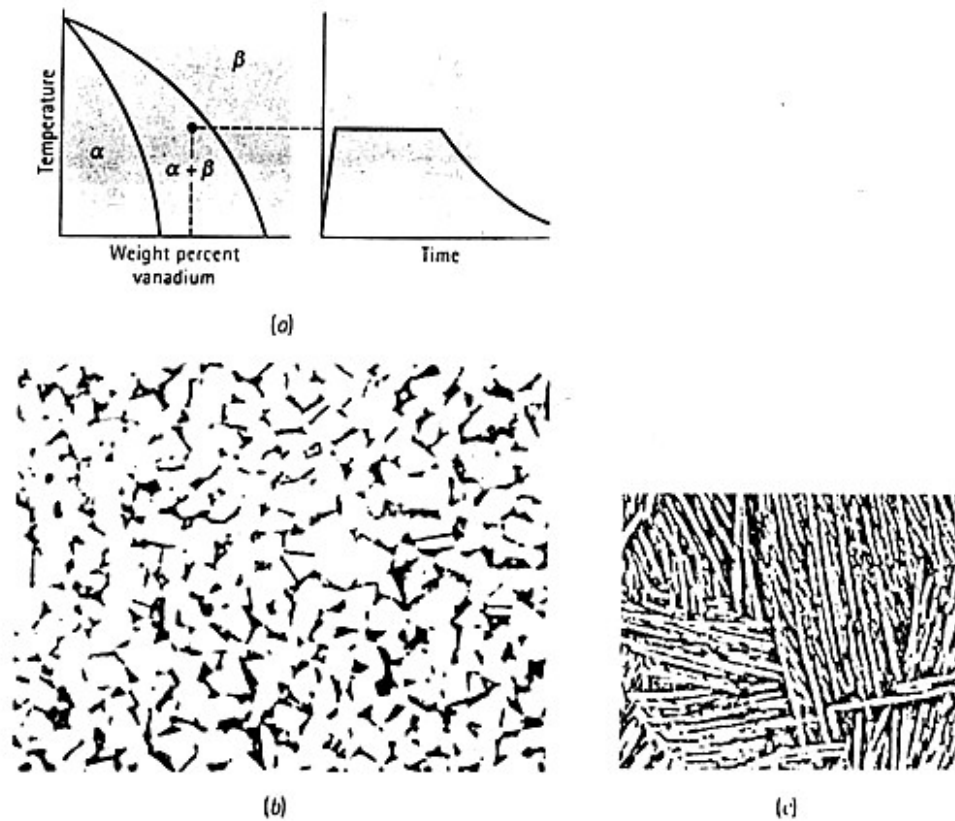


Figure 13.18
 Annealing of an alpha-beta titanium alloy. (a) Annealing is done just below the α - β transus temperature, (b) slow cooling gives equiaxed α grains ($\times 250$), and (c) rapid cooling yields acicular α grains ($\times 2500$).
 (From Metals Handbook, Vol. 7, 8th Ed., American Society for Metals, 1972.)

Soal-soal

1. Jelaskan kenapa paduan aluminium yang mengandung Mg lebih dari 15% tidak digunakan.
2. Perkirakanlah kekuatan tarik yang diharapkan dari paduan aluminium berikut:
a. 1100-H14 b. 5182-H12 c. 3004-H16
3. Sebuah batang dengan panjang 10 m dan diameter 5 mm boleh berdeformasi tidak lebih dari 2 mm karena beban. Berapakah gaya maksimum yang dapat diberikan jika batang terbuat dari:
a. Aluminium.
b. Magnesium.
c. Beryllium.
4. Misalkan batang berpenampang bundar dengan panjang 600 mm menahan beban 1,8 kN tanpa mengalami deformasi permanen. Hitunglah diameter minimum batang jika batang terbuat dari:
a. AZ80A-T5 paduan magnesium, dan
b. 6061-T6 paduan aluminium.
Hitunglah berat batang (berdasarkan Al dan Mg murni) untuk setiap kasus.
5. Apakah paduan aluminium 2024-T9 lebih kuat atau lebih lemah dari paduan 2024-T6? Jelaskan.

BAB X

KERAMIK

Keramik adalah material anorganik dan non-metal. Umumnya keramik adalah senyawa antara logam dan non logam. Untuk mendapatkan sifat-sifat keramik biasanya diperoleh dengan pemanasan pada suhu tinggi.

Keramik: - tradisional
- modern

Keramik tradisional: biasanya dibuat dari tanah liat .

Contoh: porselen, bata ubin, gelas dll.

Keramik modern: mempunyai ruang lingkup lebih luas dari keramik tradisional dan mempunyai efek dramatis pada kehidupan manusia seperti pemakaian pada bidang elektronik, komputer, komunikasi, aerospace dll.

Ikatan atom pada keramik umumnya ikatan ion, walaupun ada sebagian mempunyai kovalen

Struktur kristal

Ikatan atom : ion

- atom bermuatan positif (atom logam) : kation
- atom bermuatan negatif (non logam) : anion

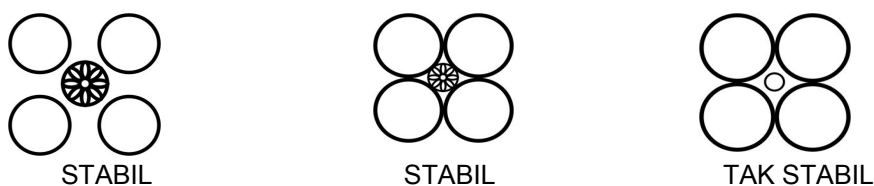
Contoh : calcium fluoride (CaF_2)

kation : Ca^+

anion : F^-

Struktur kristal keramik dipengaruhi oleh karakteristik ion-ionnya seperti: besar muatan listrik pada setiap ion, dan besar relatif antara ion (gb 13.1)

Kristal keramik akan stabil jika anion yang mengelilingi kation jika semuanya bersinggungan dengan kation.



Gambar 13.1 Stable and unstable anion-cation coordination configuration. Open circles anions : closed circles denote cation.

Bilangan koordinasi:

Jumlah anion tetangga yang paling dekat dengan kation dan bisa dihubungkan dengan dengan perbandingan jari-jari kation dan anion.




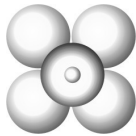

$$\text{Bilangan koordinasi} = (r_c/r_a)$$

r_c = jari-jari kation

r_a = jari-jari anion

Tabel 1 memperlihatkan macam-macam bilangan koordinasi

Tabel 1 Coordination and geometries for various cation – anion radius ration (r_c/r_a)

coordination number	cation-anion radius ratio	coordination geometri
2	< 0.55	
3	0.155-0.225	
4	0.225-0.414	
6	0.414-0.732	
8	0.732-1.0	

Tabel 13.3 memperlihatkan jari-jari ion untuk beberapa kation dan anion.

Table 13.3 Ionic Radii for Several Cations and Anions (for a Coordination Number of 6)

Cation	Ionic Radius (nm)	Anion	Ionic Radius (nm)
Al ³⁺	0.053	Br ⁻	0.196
Ba ²⁺	0.136	Cl ⁻	0.181
Ca ²⁺	0.100	F ⁻	0.133
Cs ⁺	0.170	I ⁻	0.220
Fe ²⁺	0.077	O ²⁻	0.140
Fe ³⁺	0.069	S ²⁻	0.184
K ⁺	0.138		
Mg ²⁺	0.072		
Mn ²⁺	0.067		
Na ⁺	0.102		
Ni ²⁺	0.069		
Si ⁴⁺	0.040		
Ti ⁴⁺	0.061		

Tabel 13.4 summary of some common ceramic crystal structure

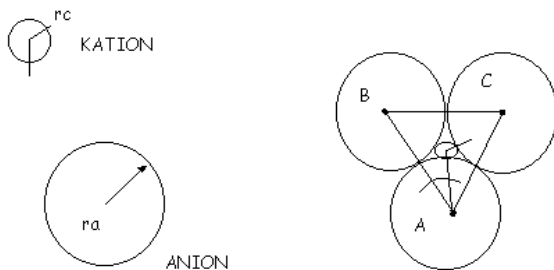
STRUCTURE NAME	STRUCTURE		COORDINATION NUMBER		EXAMPLE
	TYPE	ANION PACKING	CATION	ANION	
ROCK SALT(SODIUM CHLORIDE)	AX	FCC	6	6	NaCl, MgO, Fe
CESIUM CHLORIDE	AX	SIMPLE	8	8	CsCl
ZINC BLENDE (SPHALERITE)	AX	FCC	4	4	ZnS, SiC
FLUORITE	AX ₂	SIMPLE CUBIC	8	4	CaF ₂ , UO ₂ , ThO ₂
PEROVSKITE	ABX ₃	FCC	12(A)	6	BaTiO ₂ , SrZrO ₃ , SrSnO ₃

Contoh soal:

Perlihatkanlah bahwa ratio jari-jari katio-anion minimum untuk bilangan koordinasi 3 adalah 0,155

Jawab :

Untuk bilangan koordinasi ini, kation kecil dikelilingi oleh 3 anion untuk membentuk susunan segitiga sama sisi seperti gambar berikut:



$$\Delta APO$$

$$AP = r_A$$

$$\overline{AO} = r_A + r_c$$

$$\overline{AP}/\overline{AO} = \cos \alpha$$

$\alpha = 30^\circ$ karena garis AO membagi 2 sudut BAC(60°)

$$\overline{AP}/\overline{AO} = \frac{r_A}{r_A + r_c} = \cos 30^\circ = \sqrt{3}/2$$

$$\text{Dan } r_c/r_A = 0,155$$

A. Struktur kristal tipe AX:

A= kation X=anion

Dibagi atas kelompok-kelompok berikut:

1. Struktur rock-salt:

Contoh: NaCl

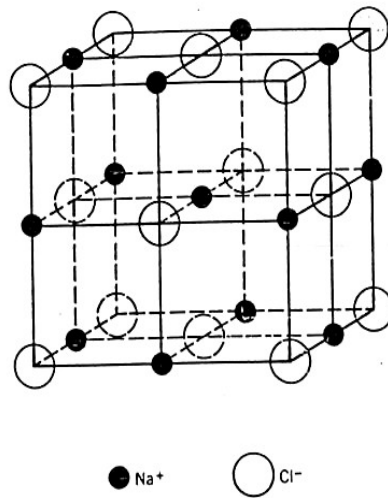


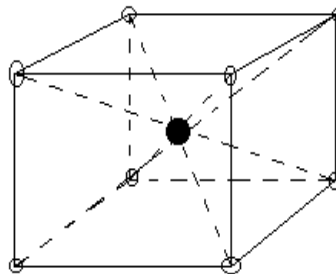
FIGURE 13.2 A unit cell for the rock salt, or sodium chloride (NaCl), crystal structure.

Bilangan koordinasi untuk anion dan kation +6

Senyawa lain : MgO, MnS, LiF, FeO

Struktur: FCC

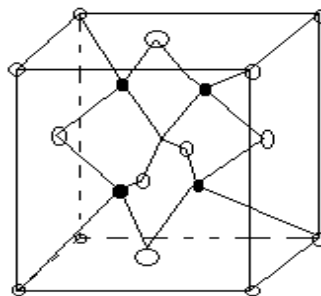
2. Struktur cesium chlorida:



CONTOH: CsCl,

Bilangan koordinasi : 8. Anion terletak ditengah-tengah kubus

3, struktur zinc blende:



Bilangan kombinasi = 4
 Contoh: ZnS, ZnTe, SiC
 Umumnya ikatan atom: kovalen

B. Struktur kristal tipe AmXp

muatan antara anion dan kation tidak sama A dan/atau p ≠ 1

Misal: tipe AX₂ : CaF₂, UO₂, PuO₂

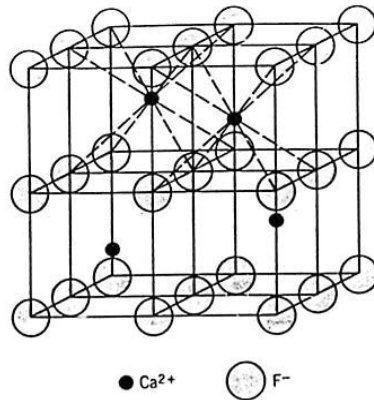


FIGURE 13.5 A unit cell for the fluorite (CaF₂) crystal structure.

C. Struktur kristal AmBnXp

Adalah mungkin bagi keramik untuk mempunyai lebih dari satu kation

A,B = kation

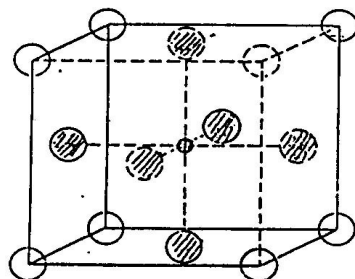
X = anion

Contoh :BaTiO₃ (barium titanat)

kation :Ba²⁺, Ti⁴⁺

anion : O²⁻

Struktur kristal: perovskite



Perhitungan Kerapatan Keramik

Kerapatan keramik dirumuskan:

$$\rho = \frac{n'(\sum A_C + \sum A_A)}{V_C N_A}$$

Dimana:

ρ = kerapatan

n' = jumlah unit formula didalam unit sel

$\sum A_C$ = jumlah berat atom semua kation dalam unit formula

$\sum A_A$ = jumlah berat atom semua anion dalam unit formula

V_C = volume unit sel

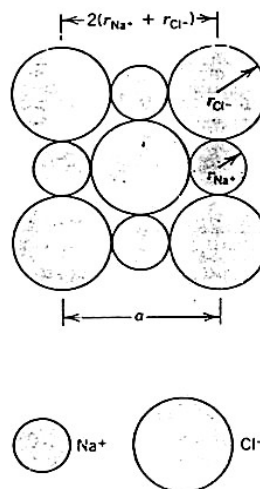
N_A = bilangan avogadro

= $6,03 \times 10^{23}$ unit formula/mol

Contoh :

Pada basis struktur kristal hitunglah kerapatan teoritis untuk sodium chlorida. Dan bandingkan dengan hasil pengukuran.

Jawab:



$$n' = 4$$

NaCl membentuk kisi FCC, jumlah unit NaCl perunit sel=4

$$\sum A_C = A_{Na} = 22,99 \text{ g/mol}$$

$$\sum A_A = A_{Cl} = 35,45 \text{ g/mol}$$

karena unit sel adalah kubus, $V_c = a^3$

a = panjang sisi kubus.

$$a = 2 r_{\text{Na}^+} + 2r_{\text{Cl}^-}$$

r_{Na^+} = jari-jari ion Na

r_{Cl^-} = jari-jari ion Cl

$$V_c = a^3 = (2 r_{\text{Na}^+} + 2r_{\text{Cl}^-})^3$$

$$(2 r_{\text{Na}^+} + 2r_{\text{Cl}^-})^3$$

pada tabel 13.3

$$r_{\text{Na}} = 0,102$$

$$r_{\text{Cl}} = 0,181$$

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{n'(\sum A_C + \sum A_A)}{V_C N_A} \\ &= \frac{4(22,99+35,45)}{[2(0,101 \times 10^{-7}) + 2(0,181 \times 10^{-7})]^3 \times 6,023 \times 10^{23}} \\ &= 2,14 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

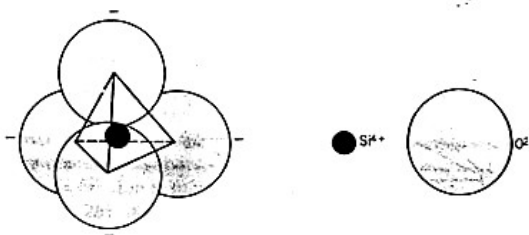
Dari tabel harga kerapatan adalah : 2,16 g/cm³ (mendekati hasil perhitungan)

Keramik Silikat

Silikat adalah senyawa silikon dengan oksigen. Banyak terdapat di muka bumi.

Unit dasar silikat adalah : SiO_4^{4-}

FIGURE 13.9 A
silicon-oxygen (SiO_4^{4-})
tetrahedron.



Silika : adalah bahan silikat paling sederhana .

rumus kimia : SiO_2

- 3 bentuk kristal polymorphic silika : quartz, cristobalite dan tridymite.

Silika bisa di buat sebagai bahan padat non-kristal atau gelas, yang susunan atomnya acak.

- Kristal silika mempunyai kerapatan yang rendah, contohnya, pada temperatur ruang kuarsa mempunyai kerapatan $2,65 \text{ g/cm}^3$. Kekuatan ikatan atom Si-O dicerminkan dengan temperatur leleh yang tinggi, $1710 \text{ }^\circ\text{C}$.

Gelas Silika

Silika bisa dibuat dalam bentuk padatan non kristal atau gelas yang mempunyai derajat keacakan atom yang tinggi. Gelas an-organik yang biasa di gunakan pada kontainer, jendela dan sebagainya adalah gelas silika yang ditambah dengan oksida lain seperti Cao dan Na_2O . Gambar 11 memperlihatkan penggambaran skematik gelas sodium-silikat.

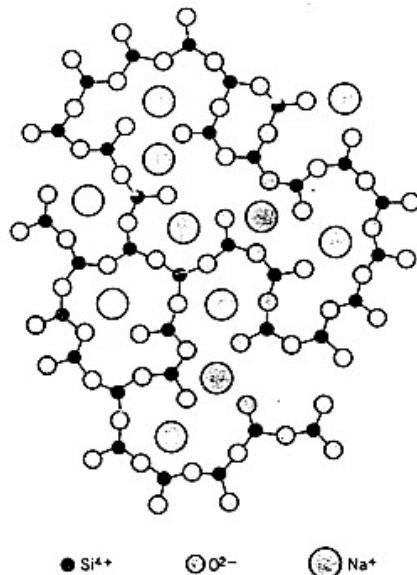
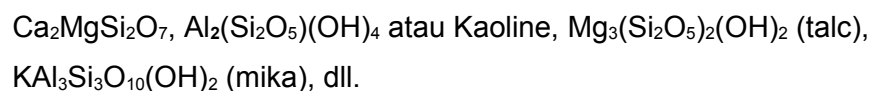


FIGURE 13.11 Schematic representation of ion positions in a sodium-silicate glass.

Silikat

Gambar 12 memperlihatkan struktur silikat yang memperlihatkan struktur yang kompleks. Diantara silikat-silikat ini, struktur yang paling sederhana diantaranya tetrahedra terisolasi (Gambar 12.a). Contohnya, forsterite (Mg_2SiO_4) yang mempunyai ekivalen dua ion Mg^{2+} berikatan dengan setiap tetrahedron sedemikian sehingga setiap ion Mg^{2+} mempunyai enam oksigen yang paling dekat.

Contoh lain senyawa silikat :



Karbon

Karbon adalah unsur yang berada dalam bentuk berbagai polimorpik, dan keadaan amorfus. Kelompok material ini sebenarnya tidak termasuk ke salah satu kelompok logam, keramik, ataupun polimer. Namun kita membicarakannya disini karena grafit, salah satu bentuk polimorpik, kadang-kadang digolongkan ke keramik dan struktur kristal intan, bentuk polimorpik lainnya, sejenis dengan struktur *zinc blende*.

Intan

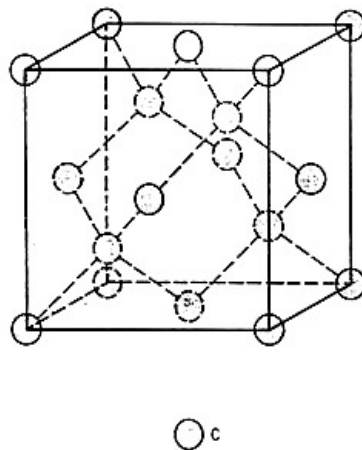


FIGURE 13.15 A unit cell for the diamond cubic crystal structure.

Intan adalah polimorpik karbon meta stabil pada temperatur ruang dan tekanan atmosfer. Struktur kristalnya adalah sejenis dengan *zinc blende* dimana karbon menempati semua posisi (kedua posisi Zn dan S), seperti yang ditunjukkan gambar 15. Ikatannya adalah kovalen. Struktur ini disebut struktur kristal *kubus intan*.

Intan mempunyai sifat sangat keras dan konduktivitas listrik yang rendah, sifat ini dikarenakan oleh struktur kristalnya dan ikatan kovalen atomnya yang kuat. Intan mempunyai konduktivitas termal yang tinggi diantara material non-logam, secara optik transparan pada daerah cahaya tampak dan infra merah. Di industri, intan digunakan untuk menggerinda atau memotong benda yang lebih lunak.

Intan berbentuk lapisan tipis banyak dikembangkan dan diantaranya digunakan sebagai pelapis pada permukaan gundi/bor, *die* (cetakan), bantalan, pisau dan *tool-tool* lainnya. Lapisan intan juga digunakan pada *speaker tweeter* dan mikrometer presisi tinggi.

Grafit

Struktur kristal grafit ditunjukkan oleh gambar 17. Struktur kristal grafit berbeda dengan intan dan juga lebih stabil pada temperatur dan tekanan ambien.

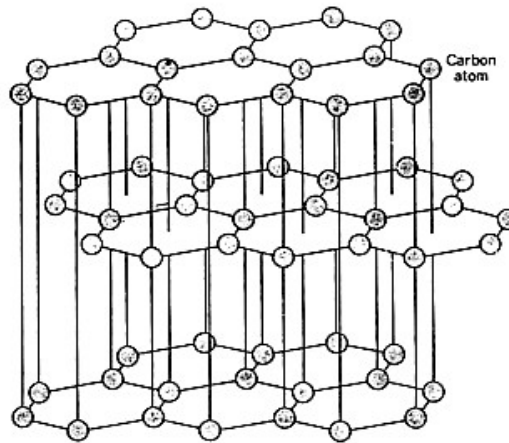


FIGURE 13.17 The structure of graphite.

Sifat-sifat grafit yang disukai adalah : kekuatan tinggi, kestabilan kimia pada temperatur tinggi, konduktivitas termal tinggi, koefisien ekspansi termal rendah dan mempunyai tahanan kejut tinggi, absorpsi gas tinggi, kemampuan pemesinan baik. Grafit umumnya digunakan untuk elemen pemanas pada dapur listrik, elektroda las, cetakan untuk pengecoran paduan logam dan keramik, nosel roket, kontak listrik, sikat dan tahanan, elektroda pada baterai, dan piranti pemurnian udara.

Ketidak Sempurnaan Pada Keramik

- **Cacat titik :**

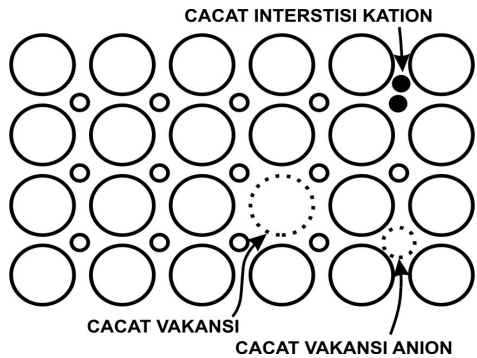
- Cacat interstisi
- Cacat vakansi

- **Cacat interstisi:**

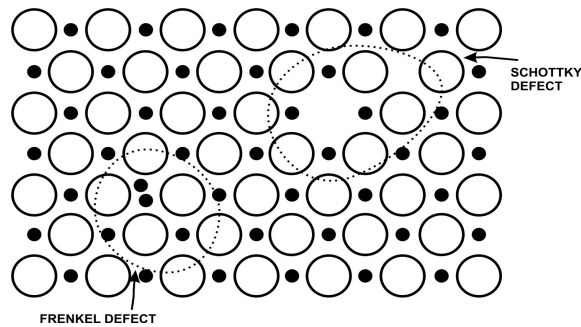
Adalah cacat karena atom menempati tempat antara 2 atom

- **Cacat vakansi:**

Adalah cacat karena kosongnya atom pada posisi tertentu.



- **Defect / cacat frenkel** :
adalah cacat yang disebabkan oleh pasangan cacat kation interstisi dan kation vakansi.
- **Cacat schottky**
Adalah cacat yang disebabkan oleh pasangan cacat kation vakansi dan anion vakansi.



Pada cacat frenkel dan schottky, jumlah muatan listrik pada bahan tetap netral.

Impurity / pengotoran pada keramik :

Atom impuritas bisa membentuk solid – solution pada keramik sama halnya seperti pada logam. Impuritas bisa berbentuk **substistusi** atau **interstisi**.

Sifat – Sifat Mekanik :

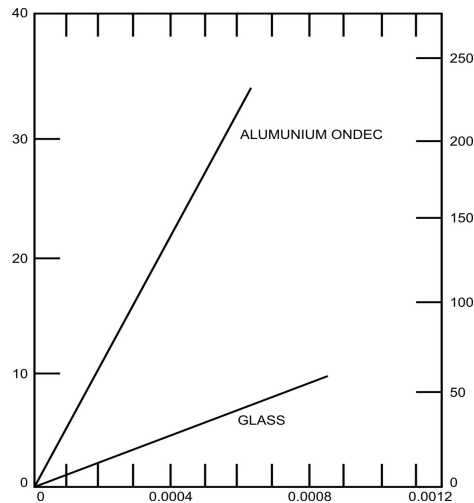
Sifat mekanik lebih terbatas dibandingkan logam. Kekurangan utama adalah patah yang terjadi getas dengan sedikit penyerapan energi. Retak yang terjadi pada keramik adalah melewati butir (trans granular) dan pada bidang yang kerapatan atomnya paling tinggi.

- Modulus patah dan modulus elastisitas beberapa keramik bisa di lihat pada tabel 13.5

- Kurva tegangan – regangan bisa di lihat pada gb. 13.29 terlihat bahwa pada keramik hubungan tegangan dan regangan adalah linier.

Table 13.5 Tabulation of rupture (bend strength) and modulus of elasticity for eight common ceramic materials

MATERIAL	MODULUS OF RUPTURE		MODULUS OF ELASTISITY	
	psi x 10 ³	MPa	psi x 10 ⁴	MPa x 10 ²
TITANIUM CARBIDE TM (TiC)	160	1100	45	34
ALUMINIUM OXIDE TM (Al ₂ O ₃)	30-60	200-345	53	57
BERYLLIUM OXIDE TM (BeO)	20-40	140-275	45	31
SILICON CARBIDE TM (SiC)	25	170	68	47
MAGNESIUM OXIDE TM (MgO)	15	105	30	21
SPINEL (MgAl ₂ O ₄)	13	90	35	24
FUSED SILICA	16	110	11	7.5
GLASS	10	70	10	7



Gambar 13.29 Typical stress-strain behavior to failure for aluminum oxide and glass.

Deformasi Plastis :

Walaupun keramik pada temperatur ruang akan patah sebelum terjadinya deformasi, penelitian yang mendalam melihat masih adanya mekanisme deformasi plastis. Deformasi plastis berbeda antara kristal dan non-kristal.

- keramik kristal → deformasi plastis terjadi karena gerakan dislokasi seperti halnya logam.
- keramik non – kristal → deformasi plastis terjadi karena aliran viskous sama halnya apabila cairan berdeformasi.

Pengaruh Porositas / Rongga:

Porositas mempengaruhi:

- Mengurangi sifat elastis dan kekuatan

- Mengurangi kekuatan patah (modulus patah)

Kekerasan:

- Kekerasan adalah salah satu keunggulan keramik. Tabel 13.6 memperlihatkan kekerasan knoop dari keramik.

Tabel 13.6 : Perkiraan kekerasan Knoop (beban 100 g) untuk 7 bahan keramik.

<i>Material</i>	<i>Perkiraan kekerasan Knoop</i>
Intan (karbon)	7000
Boron Karbida (B_4C)	2800
Silikon Karbida (SiC)	2500
Tungsten karbida (WC)	2100
Aluminium Oksida (Al_2O_3)	2100
Kuarsa (SiO_2)	800
Gelas	550

Creep:

- Keramik juga bisa mengalami creep jika bekerja pada temperatur tinggi, sama halnya seperti logam .

Soal-soal

1. Pada senyawa keramik, sebutkan dua karakteristik komponen ion yang menentukan struktur kristal.
2. Tunjukkanlah bahwa rasio jari-jari kation-anion untuk bilangan koordinasi 4 adalah 0,225.
3. Tunjukkanlah bahwa rasio jari-jari kation-anion untuk bilangan koordinasi 6 adalah 0,414 (Gunakan struktur kristal NaCl, dan asumsikan anion dan kation bersentuhan di sepanjang sisi kubus dan pada penampang diagonalnya.)
4. Berdasarkan jari-jari ion dan muatan ion, perkirakanlah struktur kristal material berikut: (a) CaO, (b). MnS, (c) Kbr, (d) CsBr. Jelaskan kenapa.
5. Hitunglah faktor penumpukan atom untuk struktur kristal cesium khlorida dimana $r_C/r_A = 0,732$.
6. Hitunglah kerapatan NiO, dimana struktur kristalnya adalah *rock salt*.
7. Hitunglah kerapatan teoritis ZnS dimana jarak atom Zn – S adalah 0,234 nm dan sudut ikatan $109,5^\circ$. Bagaimana hasilnya bila dibandingkan dengan hasil dari pengukuran?

BAB XI

POLIMER

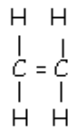
Terdapat berbagai jenis polimer.

Polimer alam : kayu, karet , katun, wool, kulit, sutera, protein, enzim, selulosa, dll.

Protein sintetik : plastik, karet, fiber, dll

Polimer berasal dari bahan organik. Kebanyakan material organik adalah senyawa hidrokarbon dengan ikatan kovalen (C dan H)

Contoh: senyawa C₂H₄



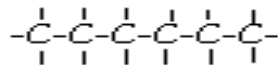
C dan C mempunyai ikatan ganda

— : ikatan tunggal

= : ikatan ganda

Molekul polimer adalah sangat besar jika dibandingkan dengan molekul hidrokarbon bahkan ukurannya sering disebut makro molekul.

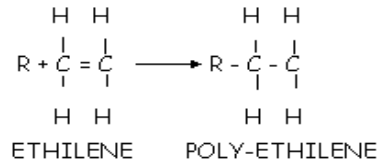
Didalam molekul, atom-atom berikatan kovalen. Pada sebagian besar polimer, molekul-molekulnya dalam bentuk rantai yang panjang dan fleksibel. Tulang belakangnya adalah urutan atom karbon.



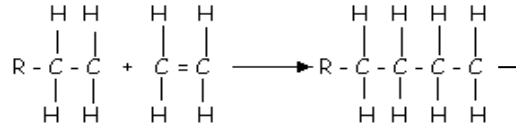
Tiap-tiap elektron valensinya yang tersisa bila berikatan dengan atom-atom radikal yang posisinya berdekatan dengan rantai. Molekul panjang ini disebut "mer"

Mer tunggal disebut dengan monomer dan mer banyak disebut dengan polimer

Jika ethilene diberi katalis, maka akan bertransformasi menjadi poly-ethylene yang adalah material polimer (r=katalis)

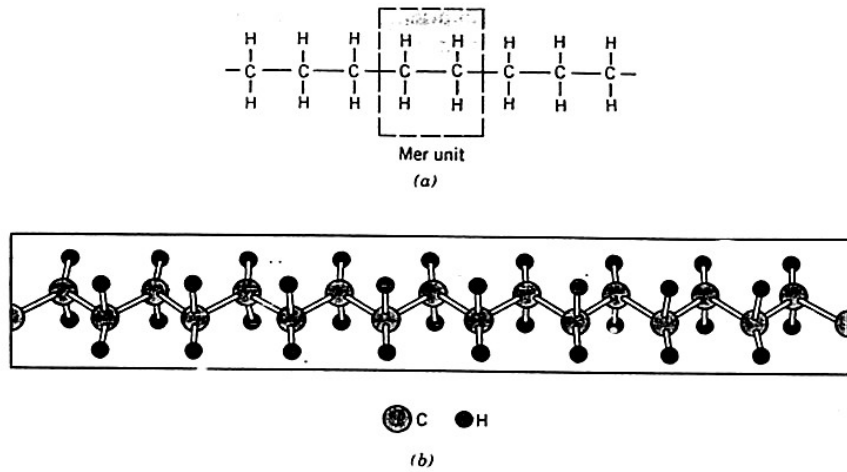


Sisi aktif polimer akan mengikat monomer lain



Jika semua atom hidrogen pada polyethilene diganti dengan fluorine, hasilnya adalah teflon. (gb 15.2)

FIGURE 15.1 For polyethylene, (a) a schematic representation of mer and chain structures, and (b) a perspective of the molecule, indicating the zigzag backbone structure.

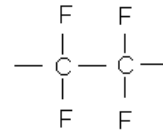


Beberapa struktur mer bisa dilihat pada tabel 15.3.

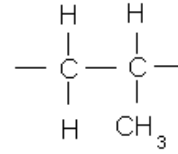
Tabel 15.3 daftar struktur mer untuk polimer yang umum.

polymer	repeating (mer) structure
Polyethylene	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ - \text{C} - \text{C} - \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} $
Polyvinyl chloride (PVC)	$ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ - \text{C} - \text{C} - \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array} $

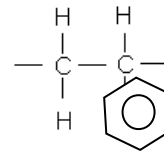
Politetraflouroethylene



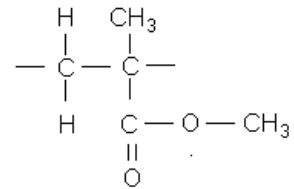
Polypropylene (PP)



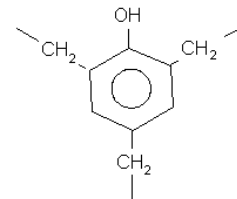
Polystyrene (PS)



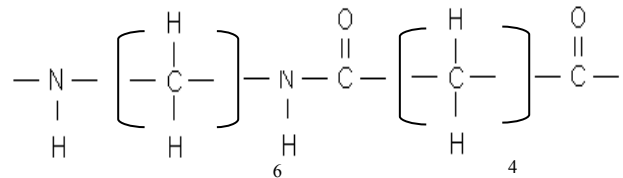
Polymethyl methaerylate (PMMA)



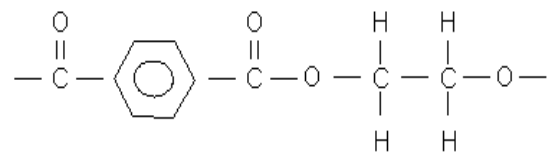
Phenol formaldehyde (bakelite)



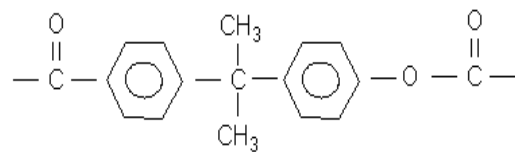
Polyhexamethyllene
Adipamide (nylon 6,6)



Polyethylene
terephthalate
(PET, polyester)



Polycarbonate

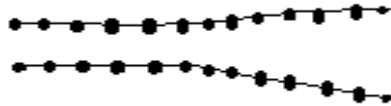


STRUKTUR MOLEKUL

Karakteristik fisik polimer tergantung dengan berat molekul dan bentuk serta perbedaan struktur rantai molekul .

1. Polimer linier :

Dimana ujungnya bergabung bersama pada ujung-ujungnya dalam rantai tunggal



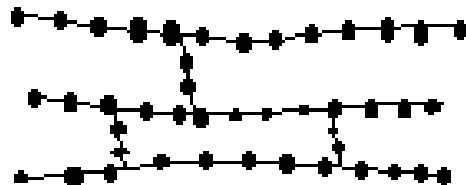
2. Polimer bercabang :

Dimana rantai utama memiliki rantai cabang



3. Polimer cross-linked :

Dimana rantai linier bergabung satu sama lain pada beberapa tempat dengan ikatan kovalen



4. Polymer network/jaringan

Dimana unit mer trifunctional yang mempunyai tiga ikatan kovalen aktif membentuk jaringan 3 dimensi



KLASIFIKASI POLIMER

Berdasarkan sifat mekanik dan sifat termal:

- Thermoplastik
- Thermosetting
- elastomer

Thermoplastik: terdiri dari rantai panjang yang dihasilkan oleh penggabungan monomer. Polimer ini diperlunak dan dibentuk dengan aliran viskous pada temperatur tinggi sifatnya fleksibel

Thermosetting: terdiri dari rantai panjang yang mempunyai struktur cross-linked
Sifat : lebih rigid, kuat tetapi getas dibanding thermoplastik

Elastomer: mempunyai struktur intermediate, sedikit struktur cross-linred.

PEMBENTUKAN RANTAI

1. Mekanisme kondensasi
2. Mekanisme addisi

Mekanisme kondensasi: pembentukan polimer dari dua monomer yang berbeda dimana sebagian atom monomer lepas. Contoh: polyester dari monomer dimethyl terephthalate dan ethylene glycol.

Mekanisme addisi: adalah reaksi dua monomer yang sama menjadi polymer namun monomer tidak kehilangan sebagian atomnya. Contoh : monomer ethylene menjadi polyethylene

APLIKASI

Polimer sangat luas aplikasinya seperti serat tekstile, serat karbon, kontainer makanan, , gasket, tubing, isolasi listrik, elektronik, pothography, ban, pipa, hose, gasket dll.

Soal-soal

1. Bedakan antara polimorfisme dan isomerisme.
2. Berdasarkan basis struktur, buatlah sketsa struktur mer untuk polimer berikut:(a) polyvinyl fluoride, (b) polychlorotrifluoroethylene, dan (c) polyvinyl alcohol.
3. Jelaskan struktur molekul dari polimer berikut: linier, bercabang, dan *cross-linked*.
4. Apa perbedaan antara polimer thermoplastis, thermosetting, dan elastomer.
5. Jelaskan cara pembentukan rantai dengan cara addisi dan kondensasi.

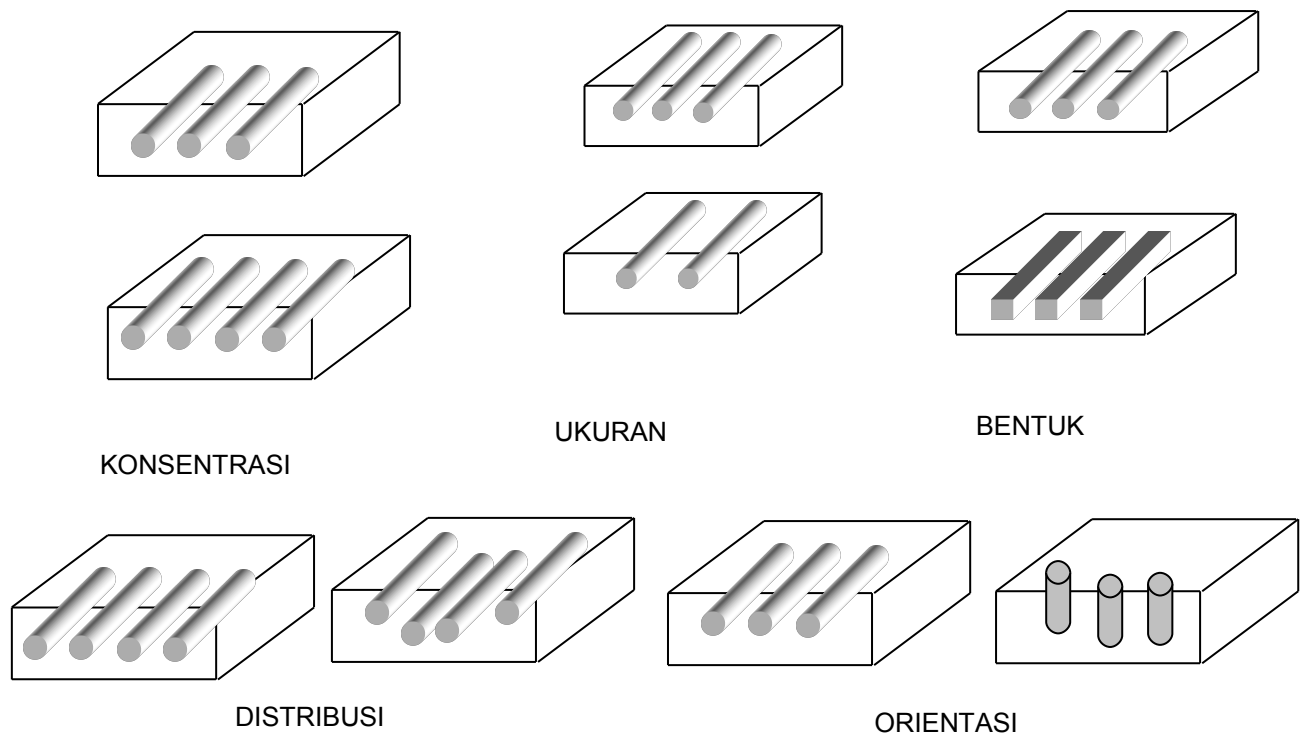
BAB XII

KOMPOSIT

Komposit adalah material 'multiphase' yang yang dibuat oleh manusia. Phase-phase tersebut secara kimia adalah tidak sama dan dipisahkan oleh permukaan / interface yang jelas.

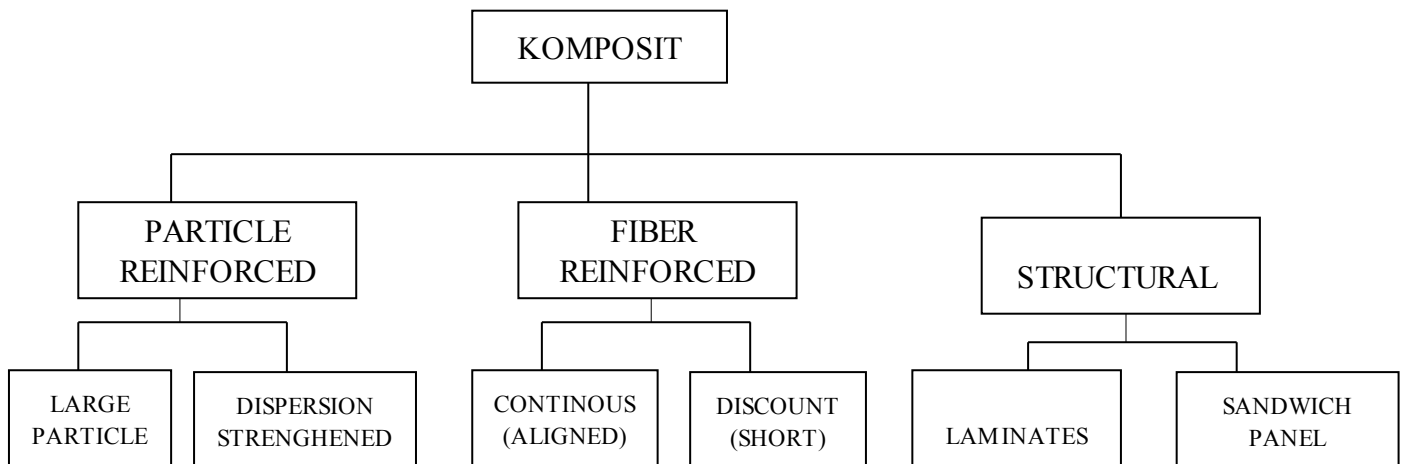
Sebagian besar paduan logam dan keramik tidak tergolong komposit karena phase-phase yang ada terbentuk karena fenomena alam. Sebagian besar komposit dibuat untuk meningkatkan kombinasi sifat-sifat mekanik seperti kekakuan, ketangguhan, kekuatan pada temperatur tinggi dan sebagainya.

Minimal komposit terdiri dari 2 fase, satu disebut matrix yaitu fase yang kontinyu dan matrix dikelilingi oleh fase kedua yang disebut fase dispersi (dispersed phase) Sifat-sifat komposit ditentukan oleh: phase induk (matrix), jumlah relatif dan bentuk geometri fase dispersi (bentuk geometri fase dispersi seperti bentuk dan ukuran partikel, distribusi dan orientasinya).



Gambar 1. Skematik bentuk geometrik komposit.

Secara skema komposit diklasifikasikan sebagai berikut :



Particled Reinforced Composites

Fase dispersinya adalah 'equiaxed' (yaitu : dimensi partikel sama disemua arah). Komposit *large particle* (partikel besar) adalah dimana interaksi antara matrix dan partikel (fase dispersi) tidak dalam skala atom atau molekul namun secara mekanika kontinyu, umumnya partikel lebih keras dan kaku dari matrix, sehingga dalam hal ini partikel berfungsi menahan gerakan matriks.

Dispersion strengthened composites, partikel ukurannya lebih kecil, yaitu diameter sekitar 0,01 – 0,1 mm. Interaksi matrix – partikel terjadi pada level atom atau molekul sama seperti mekanisme penguatan presipitasi seperti yang sudah dibicarakan pada logam.

A. Large Particle Composite

Contohnya : concrete → campuran semen (matrix dan pasir atau kerikil (partikel))

Partikel boleh mempunyai ukuran geometri yang bervariasi tapi harus mempunyai dimensi yang hampir sama kesemua arah

Sifat mekanik bisa ditingkatkan dengan meningkatkan kandungan partikel

Modulus elastisitas komposit bisa dicari dengan rumus :

$$\text{Batas atas} = E_C = E_M V_M + E_P V_P$$

$$\text{Batas bawah} = E_C = \frac{E_M E_P}{V_M E_P + V_P E_M}$$

E : modulus elastisitas

V : fraksi volume

p : partikel

M : matrix

C : komposit

Modulus elastisitas komposit harus terletak diantara batas atas dan bawah tersebut diatas.

Gb. 17.3 memperlihatkan grafik modulus elastisitas bahan partikel tungsten dan matrix tembaga.

Contoh komposit ini :

- Cermet (ceramik – metal composites cemented carbide) partikel : tungsten carbide, titanium carbide
Matrik : cobalt atau nikel
- Karet yang diperkuat oleh carbon
contoh : ban mobil → partikel 15% - 30% volume karbon hitam
- Concrete , dll

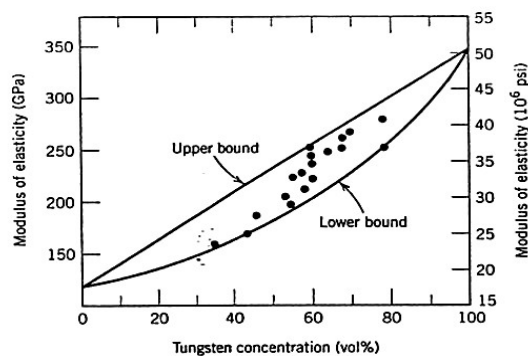


FIGURE 17.3 Modulus of elasticity versus volume percent tungsten for a composite of tungsten particles dispersed within a copper matrix. Upper and lower bounds are according to Equations 17.1 and 17.2; experimental data points are included. (From R. H. Krock, *ASTM Proceedings*, Vol. 63, 1963. Copyright ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia, PA 19103. Reprinted with permission.)

Concrete :

Partikel dan matriks → keramik

Contoh : konkrete semen dan aspal dimana pasir atau kerikil adalah komponennya.
Semen atau aspal sebagai media perekat

- Concrete semen

Kandungan : portland cement, pasir, kerikil, air

Partikel pasir akan mengisi ruang diantara kerikil. Air digunakan untuk merekatkan semen dengan partikel

- Reinforced concrete

Bertujuan untuk meningkatkan *concrete semen* dengan cara penambahan penguat seperti besi baja, kawat, jaring kawat dan lain-lain.

B. Dispersion – Strengthened Composites

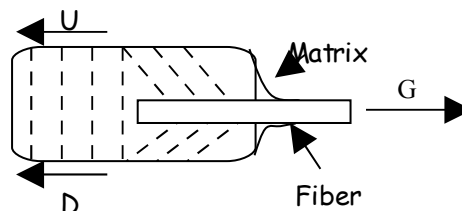
Logam dan logam paduan bisa diperkuat dengan dispersi uniform dari beberapa % vol. Partikel halus yang berupa material sangat keras dan lembam . Contoh bahan dispersi tersebut adalah logam atau non logam (seperti material oksida yang sering digunakan) contoh : bahan paduan nikel tahan temperatus tinggi diperkuat dengan 3 % vol. Thoria (ThO₂).

Fiber Reinforced Composite

Partikel berbentuk serat atau ‘fiber’. Ada serat yang berbentuk panjang (kontinyu) dan pendek (short)

Pengaruh panjang serat

Karakteristik mekanik komposit fiber tidak hanya dipengaruhi oleh sifat serat tetapi juga derajat beban yang diberikan ke serat dari matriks.



Panjang kritis serat , l_c :

$$l_c = \frac{\sigma_F d}{2\tau_e}$$

l_c = panjang kritis serat

d = diameter fiber

σ_F = tegangan tarik

τ_e = kekuatan luluh geser

Untuk kombinasi gelas dan serat karbon, panjang kritis ada pada orde 1 mm yaitu sekitar 20 sampai 150 kali diameter serat.

Komposit Serat Gelas (fibreglass)

Fiberglass/serat kaca adalah komposit yang terdiri dari serat gelas (baik kontinyu atau diskontinyu) dengan matrik plastik.

Serat gelas mempunyai banyak macam keuntungan, sebagai bahan penguat karena :

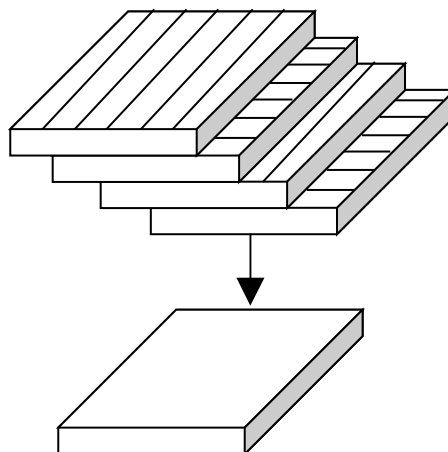
1. Mudah ditarik menjadi serat berkekuatan tinggi dari keadaan lunak
2. Mudah didapat dan dipabrikasi menjadi plastik yang diperkuat dengan serat gelas
3. Sebagai serat ia kuat, dan bila disatukan dengan matriks plastik akan memberikan komposit yang mempunyai kekuatan tinggi
4. Sangat berguna pada lingkungan yang korosif.

Komposit struktur

Komposit struktur biasanya terdiri dari material homogen dan komposit. Dua tipe dari komposit ini adalah komposit laminar dan komposit *sandwich panel*.

A. Komposit laminar

Terdiri dari lembaran-lembaran dimensi atau panel yang mempunyai kekuatan tarik pada arah tertentu seperti yang ditemukan pada kayu. Lembaran-lembaran ini ditumpuk dan direkat dengan semen. Arah orientasi serat berbeda pada masing-masing lapisan.



B. Sandwich panel

Terdiri atas dua lembar paling luar yang kuat, kemudian diantaranya terdapat lembaran yang mempunyai kerapatan rendah yang disebut juga inti. Inti mempunyai kekuatan dan kekakuan yang lebih rendah. Lembaran luar yang umum digunakan : paduan aluminium, fiber reinforced plastik, titanium, baja dan plywood.

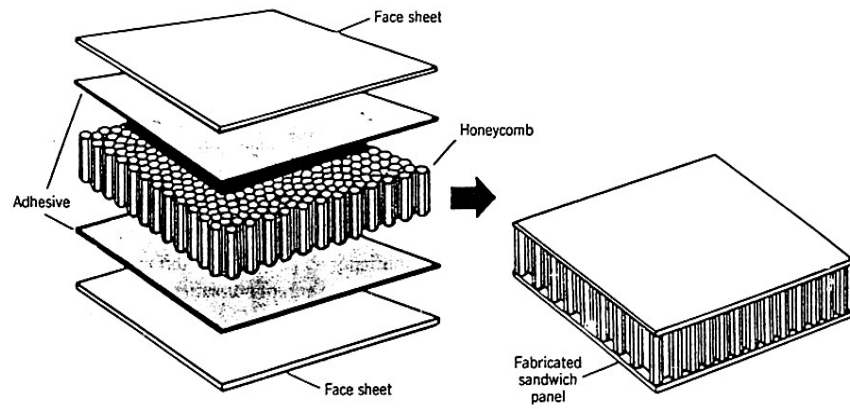


FIGURE 17.16 Schematic diagram showing the construction of a honeycomb core sandwich panel. (Reprinted with permission from *Engineered Materials Handbook*, Vol. 1, *Composites*, ASM International, Metals Park, OH, 1987.)

Soal-soal

1. Sebutkan perbedaan umum mekanisme penguatan antara komposit *Large particle* dengan *dispersion strengthened composites*.
2. Sebutkan satu persamaan dan dua perbedaan antara penguatan presipitasi dan penguatan *strengthening*.
3. Komposit *large particle* yang terdiri dari partikel *tungsten* dengan matriks tembaga dibuat. Jika fraksi volume tungsten dan tembaga berturut-turut adalah 0,60 dan 0,40, perkirakanlah batas atas kekakuan spesifik komposit ini berdasarkan data berikut:

	Gravitasi spesifik	Modulus Elastisitas (GPa)
Tembaga	8,9	110
Tungsten	19,3	407

4. a. Apakah bedanya antara matriks dan fasa dispersi pada bahan komposit?
b. Bedakan sifat mekanik matriks dan fasa dispersi pada komposit *fiber reinforced*.
5. a. Apa perbedaan antara semen dengan konkrit?
b. Sebutkan tiga batasan penting yang membatasi penggunaan konkrit sebagai material struktur.
c. Jelaskan dengan ringkas tiga teknik yang digunakan untuk memperkuat konkrit dengan penguatan.

BAB XII

KODE DAN STANDAR

Standar adalah sekumpulan spesifikasi untuk komponen, material atau proses yang dimaksudkan untuk mencapai keseragaman, efisiensi dan kualitas khusus.

Kode adalah sekumpulan spesifikasi untuk analisis, desain, pembuatan dan konstruksi suatu benda. Tujuan *kode* adalah untuk mencapai derajat tertentu dari keselamatan, efisiensi dan unjuk kerja atau kualitas. Penting untuk diamati bahwa kode keselamatan tidak diartikan keselamatan mutlak. Kenyataannya keselamatan mutlak tidak mungkin untuk dicapai.

Nama organisasi dan kelompok profesi dibawah ini telah menetapkan spesifikasi untuk standar dan keselamatan atau kode desain. Dari nama organisasi tersebut, bisa memberikan petunjuk tentang jenis standar atau kode yang mereka keluarkan.

- Aluminum Association (AA)
- American Gear Manufacture Association (AGMA)
- American Institute of Steel Construction (AISC)
- American Iron and Steel Institute (AISI)
- American National Standards Institute (ANSI)
- American Society for Metals (ASM)
- American Society of Mechanical Engineers (ASME)
- American Society of Testing Materials (ASTM)
- American Welding Society (AWS)
- Anti-Friction Bearing Manufacturers Association (AFBMA)
- British Standards Institution (BSI)
- Industrial Fasteners Institute (IFI)
- Institution of Mechanical Engineers (I. Mech. E.)
- International Bureau of Weights and Measures (BIPM)
- International Standards Organization (ISO)
- National Bureau of Standards (NBS)
- Society of Automotive Engineers (SAE)

DAFTAR PUSTAKA

Askeland DR. *The Science and Engineering Material*. Chapman & Hall

Avner S.H. *Introduction to Physical Metallurgy, 2nd edition*. McGraw-Hill Book Co.,
1974

Callister William D. Jr. *Material Science and Engineering, an introduction*. John
Wiley & Son Inc., 1997