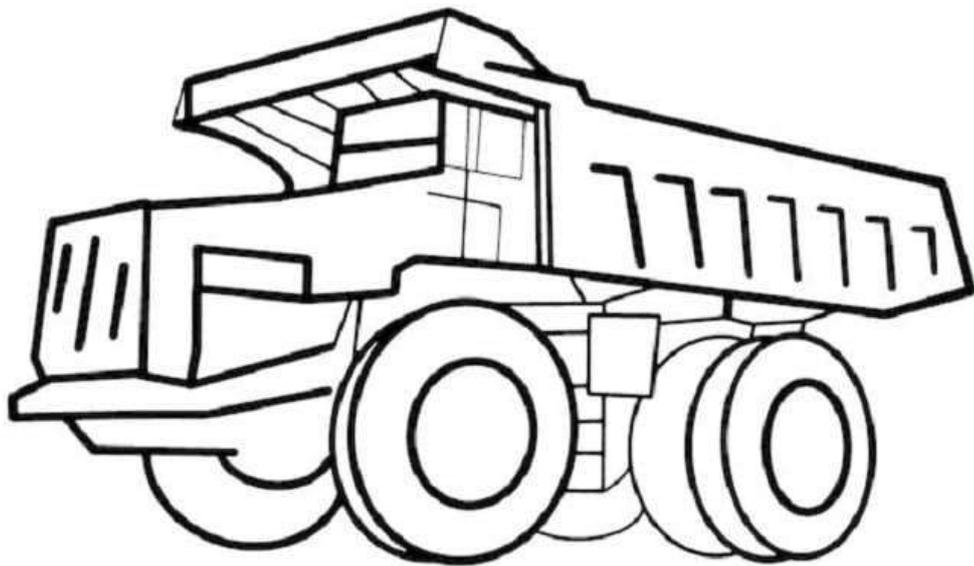


**BUKU AJAR MATERIAL**  
**TEKNIK REKAYASA ALAT BERAT**  
**(PROGRAM STUDI D4)**



**POLITEKNIK ASTRA**  
**JAKARTA**

# **Buku Ajar Material Teknik Rekayasa Alat Berat**

**Penulis:**

Vuko A T Manurung

**ISBN:**

**Editor:**

Dr. Yohanes Tri Joko W., S.T., M.T.

**Penyunting:**

Wanda ST MT

**Desain Sampul dan Tata Letak:**

Susilo

**Penerbit:**

LP2M Politeknik Astra

Jl. Gaya Motor Raya No. 8 Sunter II Jakarta 14330

Telepon: (021) 6519555 Fax: (021) 6519821

Email: [sekretariat@polytechnic.astra.ac.id](mailto:sekretariat@polytechnic.astra.ac.id)

**Cetakan Pertama, Januari 2025**

**Hak Cipta dilindungi undang-undang.**

**Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit.**

## **Kata Pengantar**

Dengan berselimutkan rasa syukur kepada Tuhan yang maha Agung, kami haturkan ke hadapan para pembaca dan keluarga besar Politeknik Astra, diktat Material Teknik Rekayasa Alat Berat. Program studi rekayasa alat berat memang relatif baru dan khusus untuk level D4 masih sangat sedikit institusi yang mengadakannya. Oleh karena itu kami membertakan diri untuk membuat diktat ini.

Secara khusus, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu sehingga buku ini dapat diterbitkan.

Kami menyadari buku ini tidak lepas dari kekurangan. Segala kritik, saran dan harapan demi lebih baiknya buku ini merupakan kesenangan kami berikutnya.

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Logam ( <i>Metals</i> ).....	1
1.2 Keramik ( <i>Ceramics</i> ).....	2
1.3 Material Polimer/Plastik ( <i>Polymeric/Plastic Materials</i> ).....	3
1.4 Material Komposit ( <i>Composite Materials</i> ).....	3
1.5 Material Elektronik ( <i>Electronic Materials</i> ).....	3
1.6 Sifat Logam yang Penting Lainnya.....	4
<b>BAB 2 KRISTAL DAN STRUKTUR KRISTAL</b> .....	<b>5</b>
2.1 <i>Body-Centered Cubic</i> (BCC). ....	5
2.2. <i>Face-Centered Cubic</i> (FCC).....	6
2.3 <i>Hexagonal Close-Packed</i> (HCP).....	6
2.4 <i>Polymorphism</i> atau <i>Allotropy</i> .....	7
2.5 Pembekuan logam.....	8
2.6 Difusi atom di dalam Padatan ( <i>solid</i> ).....	10
<b>BAB 3 SIFAT MEKANIK LOGAM DAN PADUANNYA</b> .....	<b>12</b>
3.1 Konsep Tegangan dan Regangan .....	13
3.2 Tegangan Teknik dan Regangan teknik.....	14
3.2.1 Tegangan Teknik ( <i>Engineering Stress</i> ).....	14
3.2.2 Regangan teknik ( <i>Engineering Strain</i> ).....	14
3.2.3 <i>Poisson's Ratio</i> .....	14
3.3 Uji Tarik dan Diagram Tegangan-Regangan Teknik.....	15
3.3.1 Modulus elastisitas.....	17
3.3.2 Kekuatan luluh ( <i>Yield strength</i> ).....	17
3.3.3 Kekuatan tarik maksimum.....	18
3.3.4 Keuletan ( <i>Ductility</i> ).....	20
3.4 Tegangan Sebenarnya dan Regangan Sebenarnya.....	21
3.5 Kekerasan ( <i>Hardness</i> ).....	23
3.6 Mekanisme penguatan Logam.....	24
3.6.1 Ukuran Butir.....	24
3.6.2 Penguatan dengan Cara Larutan Padat ( <i>Solid-Solution Strenghtening</i> ).....	25

3.5.3 Recovery, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir ( <i>Grain Growth</i> ).....	26
3.7 Kelelahan Logam.....	27
3.8 Mulur ( <i>Creep</i> ) pada Temperatur Tinggi.....	30
<b>BAB 4 PADUAN LOGAM FERRO DAN NON FERRO.....</b>	<b>31</b>
4.1 Pembuatan Besi dan Baja .....	31
4.2 Diagram Fasa Besi-Besi Carbida.....	32
4.3 Baja Plain Karbon.....	34
4.4 Paduan Logam Ferro ( <i>Ferrous Alloys</i> ).....	36
4.4.1 Baja Paduan Rendah ( <i>Low Alloy Steels</i> ).....	32
4.4.1.1 Baja Karbon Rendah ( <i>Low Carbon Steels</i> ).....	37
4.4.1.2 Baja Karbon Sedang ( <i>Medium Carbon Steels</i> ).....	39
4.4.1.3 Baja Karbon Tinggi ( <i>High Carbon Steels</i> ).....	39
4.4.2 Baja Paduan Tinggi ( <i>High Alloy steels</i> ).....	41
4.4.3 Baja Alat-Potong.....	42
4.5 Baja Tahan Karat.....	43
4.5.1 Baja Tahan Karat Feritik.....	45
4.5.2 Baja Tahan Karat Auatenitik.....	45
4.5.3 Baja Tahan Karat Martensitik.....	46
4.6 Besi Cor/Tuang ( <i>Cast Iron</i> ).....	47
4.6.1 Besi Cor Kelabu ( <i>Gray Cast Iron</i> ).....	48
4.6.2 Besi Cor Nodular/Ductile ( <i>Ductile/nodular iron</i> ).....	50
4.6.3 Besi Cor Putih ( <i>White Cast Iron</i> ).....	50
4.6.4 Besi Cor Maliabel ( <i>Malleable Cast Iron</i> ).....	51
4.7 Logam Non-Fero dan Paduannya.....	52
4.7.1 Aluminium (Al) dan Paduan Aluminium.....	52
4.7.2 Titanium (Ti) dan Paduan.....	55
4.7.3 Nikel (Ni) dan paduannya.....	56
4.7.4 Tembaga (Cu) dan Paduannya.....	58
4.7.5 Magnesium (Mg) dan Paduannya.....	59
4.7.6 Paduan Kekuatan Tinggi ( <i>Super Alloys</i> ).....	59
4.7.7 Logam Mulia ( <i>Noble materials</i> ).....	60
4.7.8 Material Refraktori ( <i>Refractory Materials</i> ).....	60
4.7.9 Paduan yang Memiliki Titik Cair Rendah.....	61
<b>BAB 5 LOGAM NON FERRO.....</b>	<b>62</b>
5.1 Keramik.....	62
5.2 Polimer.....	64

5.2.1 Fiber.....	65
5.2.2 Material plastik.....	65
5.2.3 Elastomer (Rubbers/Karet).....	67
<b>BAB 6 KOROSI.....</b>	<b>68</b>
6.1 Pendahuluan.....	68
6.2 Korosi Umum ( <i>Uniform/General Attack</i> ).....	69
6.3 Korosi Galvanik ( <i>Galvanic Corrosion</i> ).....	70
6.4 Korosi celah ( <i>Crevice Corrosion</i> ).....	73
6.5 Korosi sumur ( <i>Pitting Corrosion</i> ).....	74
6.6 Korosi Batas Butir ( <i>Intergranular Corrosion</i> ).....	74
6.7 Korosi Selektif ( <i>Selective Leaching</i> ).....	75
6.8 Korosi Erosi ( <i>Erosion Corrosion</i> ).....	76
6.9 Korosi Tegangan ( <i>Stress Corrosion</i> ).....	76
6.10 Korosi Lelah ( <i>Corrosion Fatigue</i> ).....	76
6.11 Pencegahan Korosi.....	77
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>78</b>

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### Objektif :

1. Mengetahui jenis-jenis material
2. Mengetahui sifat-sifat material

Mengapa kita perlu mempelajari/mengenal material (ilmu material)? Banyak persoalan sains terapan dan atau rekayasa (engineering) dalam bidang mekanik, mesin, sipil, kimia, elektrik/elektronik ataupun yang lainnya mengikutsertakan material didalamnya. Sebagai contoh perlunya material yang kuat untuk bangunan yang tinggi, roda gigi pada mobil berkecepatan tinggi (super car), material I/C (integrated circuit chip) dan semikonduktor, pengeboran minyak didarat maupun di laut dan lain lain. Pada umumnya *engineering materials* (material teknik) di bagi kedalam 3 golongan utama, yaitu: Metal/logam (*metallic*), Keramik, Polimer/plastik (*polymeric/plastic*).

### 1.1 Logam (*Metals*).

Metal/logam adalah jenis inorganik yang terdiri dari satu atau lebih bahan logam dan bukan logam yang berpadu. Logam, contoh : Fe, Cu, Al, Ni, dan Ti. Bukan logam (non logam), contoh : C, Si, O<sub>2</sub>. Secara umum logam memiliki sifat termal dan pengantar listrik (conductor) yang baik. Beberapa logam memiliki sifat

yang kuat dan liat (*ductile*) pada temperatur kamar dan bahkan ada yang memiliki kekuatan yang baik meskipun bekerja pada temperatur tinggi.

Logam dan paduannya biasanya dibagi kedalam dua golongan : logam ferro (*ferrous metals*) dan paduannya, yang mengandung sejumlah besar besi seperti pada baja dan besi cor, kemudian logam non ferro (*nonferrous metals*) dan paduannya, yang tidak mengandung besi (Fe) atau hanya mengandung sedikit saja besi, contoh: Al, Cu, Zn, Ti, Ni.

## **1.2 Keramik (*Ceramics*)**

Keramik adalah material inorganik yang terdiri dari elemen logam dan bukan logam yang bersama-sama terikat secara kimiawi. Material keramik terdiri dari kristalin dan non-kristalin atau paduan keduanya. Kebanyakan keramik memiliki kekerasan yang tinggi, dan kekuatan pada temperatur yang tinggi, tetapi cenderung menjadi getas (*brittle*). Dengan teknologi yang semakin maju keramik telah dikembangkan pemakaiannya untuk mesin-mesin yang bergerak (*engine applications*). Keuntungan dari pemakaian keramik pada mesin adalah berat yang ringan, kekuatan dan kekerasan yang tinggi, tahan panas dan tahan gesekan, insulator yang baik. Sedangkan kerugiannya adalah memiliki sifat yang sangat getas (*brittle*) sehingga mudah sekali pecah/retak apabila terkena getaran. Perkembangan teknologi saat ini dimungkinkan untuk mendapatkan sifat yang baik dari keramik dengan memperkecil sifat getasnya.

### **1.3 Material Polimer/Plastik (*Polymeric/Plastic Materials*).**

Kebanyakan material polimer terdiri dari karbon dengan ikatan molekular yang memiliki rantai yang panjang. Strukturnya kebanyakan adalah non- kristalin (noncrystalline) tetapi ada juga yang merupakan campuran antara kristalin dan non-kristalin. Beberapa jenis material plastik sangat baik sebagai insulator listrik (gambar 1.3). Secara umum polimer memiliki berat jenis yang rendah, dan relatif lebih lunak.

### **1.4 Material Komposit (*Composite Materials*).**

Komposit adalah paduan dua atau lebih material. Paduan tersebut bertujuan untuk menghasilkan material yang memiliki karakteristik yang spesifik dan sifat-sifat tertentu yang dikehendaki. Sebagai contoh material yang memiliki kekerasan yang tinggi tetapi relative liat dan tidak getas, serta berat yang ringan. Penggunaan komposit saat ini sudah demikian maju terutama untuk industri oromotif dengan tujuan untuk menghemat pemakaian bahan bakar.

### **1.5 Material Elektronik (*Electronic Materials*).**

Material elektronik diproduksi dalam jumlah yang sedikit, akan tetapi sangat penting untuk perkembangan teknologi tinggi (*advanced engineering technology*). Jenis yang paling penting adalah silicon yang telah dimodifikasi untuk

menghasilkan sifat-sifat elektrik yang lebih baik. Peralatan mikroelektronik telah memungkinkan dihasilkannya peralatan komunikasi yang canggih dan ukuran yang semakin kecil (*down sizing*) seperti komputer, *mobile phone*, dan peralatan yang membutuhkan ketahanan panas yang tinggi. Perkembangan diantara ke lima jenis material diatas terlihat jelas pada industri otomotif.

## **1.6 Sifat Logam yang Penting Lainnya.**

Dalam membuat suatu konstruksi, pemilihan bahan/material yang akan digunakan harus disesuaikan dengan sifat-sifat logam yang bersangkutan beberapa sifat logam yang penting untuk diketahui, antara lain mampu tempa (*malleability*) yaitu sifat logam yang mudah dibentuk dengan suatu gaya, baik dalam keadaan dingin maupun panas, tanpa terjadi kerusakan. Sifat berikutnya adalah keliatan (*ductility*) yaitu dapat dibentuk dengan tarikan tanpa menunjukkan gejala putus. Sifat lainnya yang penting adalah keuletan (*toughness*) kemampuan suatu logam untuk dibengkokkan beberapa kali tanpa retak, kekerasan (*hardness*) ketahanan suatu logam terhadap penetrasi/penusukan logam lain, kekuatan (*strength*) kemampuan suatu logam untuk menahan gaya yang bekerja atau kemampuan logam menahan deformasi, mampu las kemampuan logam untuk dilas, ketahanan korosi, kemampuan material untuk menahan korosi/karat akibat zat-zat kimia, lingkungan, dll. mampu mesin kemampuan material untuk dibentuk dengan proses permesinan, kegetasan/kerapuhan (*brittleness*), sifat logam yang mudah retak (sifat ini berlawanan dengan keuletan)

## BAB 2

### KRISTAL DAN STRUKTUR KRISTAL

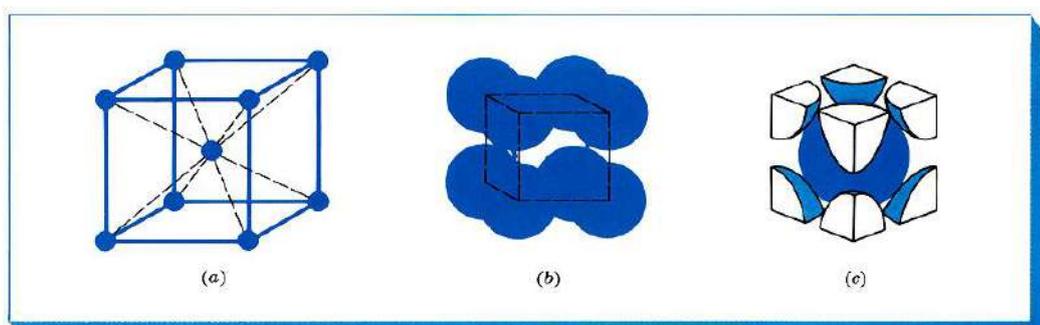
Objektif :

- a. Mengetahui jenis struktur kristal.
- b. Mengetahui sifat-sifat kristal pada material.

Secara umum logam/metal (90%) memiliki struktur kristal (setelah mengalami pembekuan) dari kondisi cair, dalam bentuk : Body-Centered Cubic (BCC); Face-Centered Cubic (FCC); Hexagonal Close-Packed (HCP). Ketiga bentuk Kristal akan diuraikan hal-hal penting sesuai untuk penggunaan di politeknik.

#### 2.1 Body-Centered Cubic (BCC).

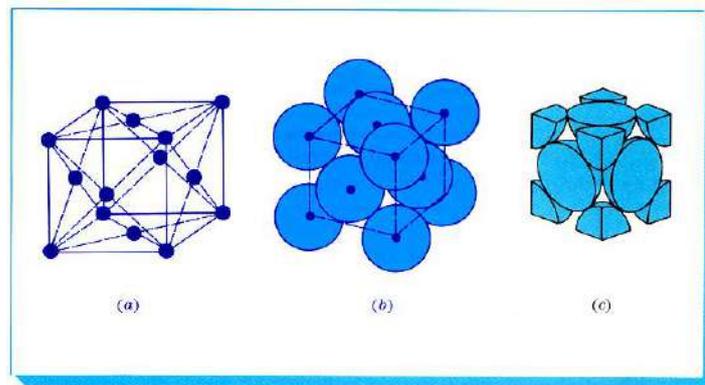
Jumlah atom per-unit pada logam dengan struktur kristal BCC ada 2, yaitu 1 ditengah dan  $8 \times \frac{1}{8}$  disetiap sudutnya, seperti terlihat digambar 2.1. Contoh (logam temperatur  $20^{\circ}\text{C}$ ): Cr ; Tantalum (Ta); V; Mo; Tungsten; Fe- $\alpha$



Gambar 2.1. Sel unit BCC (*Body-Centered Cubic*)

## 2.2 Face-Centered Cubic (FCC).

Jumlah atom per-unit sel pada logam dengan struktur kristal FCC ada 4 (gambar 2.2), yaitu:  $8 \times \frac{1}{8}$  di setiap sudut, dan  $6 \times \frac{1}{2}$  di setiap muka. contoh (pada temperatur  $20^{\circ}\text{C}$ ): Al; Au; Ag; Cu; Ni; Pt.

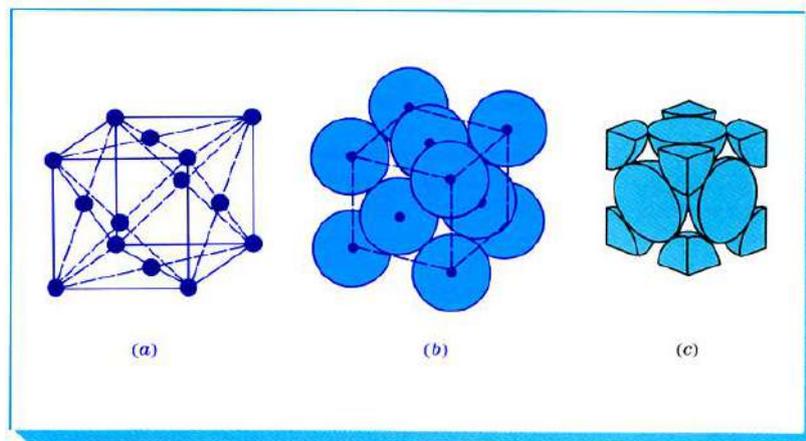


Gambar 2.2 unit FCC. (a) sel unit Atomic-site; (b) sel unit hard-sphere; (c) sunit isolated.

## 2.3 Hexagonal Close-Packed (HCP).

Jumlah atom per-unit sel pada logam dengan struktur kristal HCP ada 6, yaitu tiga atom membentuk segitiga dilapisan tengah, dengan rincian  $6 \times \frac{1}{6}$  atom pada kedua lapisan atas dan bawah sehingga menghasilkan ( $2 \times 6 \times \frac{1}{6} = 2$ ), dan

$\frac{1}{2}$  atom yang terletak ditengah-tengah dari kedua lapisan atas dan bawah sehingga membentuk 1 atom. Contoh logam HCP adalah: Co; Zn; Zr; Mg; Ti, Be.



Gambar 2.3 Hexagonal Close-Packed (HCP).

#### 2.4 *Polymorphism* atau *Allotropy*.

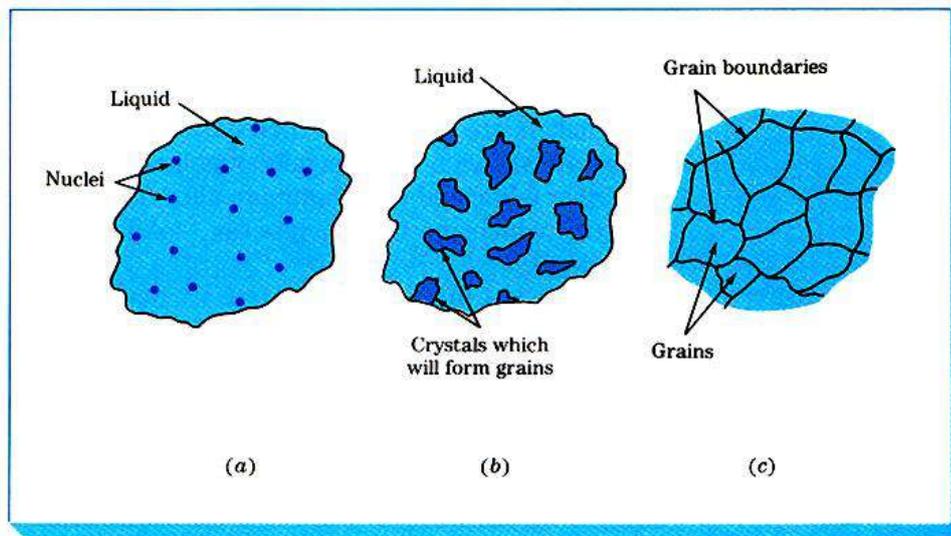
Kebanyakan logam dan paduannya memiliki bentuk kristal yang lebih dari satu tergantung dari temperatur dan tekanan yang bekerja. Fenomena ini disebut sebagai polymorphism atau allotropy. Contohnya ada pada tabel 1

Tabel 2.1 Bentuk-bentuk kristal allotropic dari beberapa logam

<i>Logam</i>	<i>Struktur kristal</i>	<i>Struktur kristal</i>
<i>Metal</i>	<i>Pada temp. kamar</i>	<i>pada temp. tertentu</i>
Ca	FCC	BCC (>447°C)
Co	HCP	FCC (>427°C)
Hf	HCP	BCC (>1742 °C)
Fe	BCC	FCC (912-1394°C) BCC (>1394°C)
Li	BCC	HCP (<-193°C)
Na	BCC	HCP (<- 233°C)
Tl	HCP	BCC (>234°C)
Ti	HCP	BCC (>883°C)
V	HCP	BCC (>1481°C)
Zr	HCP	BCC (>872°C)

## 2.5 Pembekuan logam.

Proses pembekuan logam dan paduannya menjadi faktor yang penting pada industri karena logam dicairkan kemudian di tuang kedalam cetakan menjadi material setengah (semifinished shape) jadi maupun material jadi (*finished shape*). Gambar 2.4 merupakan ilustrasi proses pembekuan logam mulai dari kondisi cair sampai mengeras (padat)



Gambar 2.4 Ilustrasi pembentukan logam dari kondisi cair.

Secara umum proses pembekuan logam atau paduan dapat dibagi kedalam beberapa langkah sebagai berikut (seperti ilustrasi pada gambar 2.4.):

- pertama-tama pembentukan inti (*nucleation*) yang stabil didalam cairan (gambar 2.4 a),
- kemudian diikuti dengan pertumbuhan inti didalam kristal (gambar 2.4 b), dan terakhir adalah pembentukan batas butir (gambar 2.4 c),
- dimana inti yang satu bertemu dengan intilainya. Dengan demikian proses pertumbuhan inti berhenti.

Idealnya struktur kristal hasil proses pembekuan memiliki satu struktur kristal tunggal sehingga memiliki kekuatan yang sama dalam segala arah. Akan tetapi kenyataannya struktur kristal yang terbentuk tidak ada yang sempurna dan selalu

menimbulkan cacat, sehingga mempengaruhi sifat-sifat fisik, mekanik, mampu bentuk pada proses dingin, konduktivitas listrik dan sifat korosi dari logam.

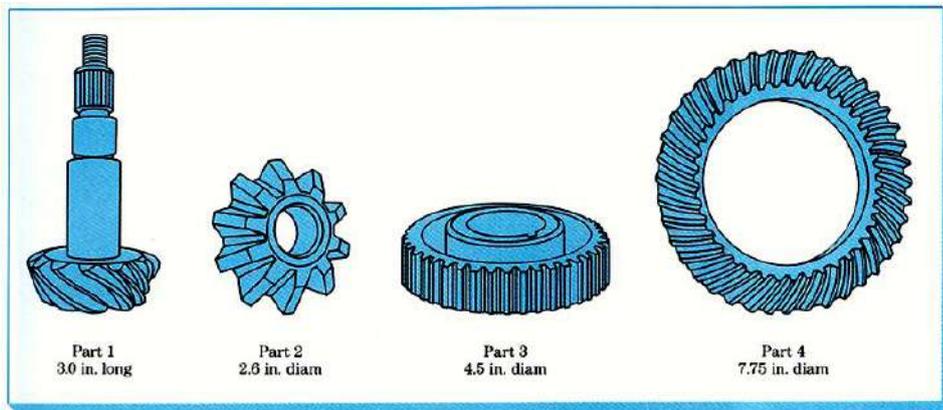
## **2.6 Difusi atom di dalam Padatan (solid).**

Difusi didefinisikan sebagai mekanisme perpindahan suatu zat melalui zat lainnya. Didalam gas perpindahan atom relatif lebih cepat dibandingkan dengan cair maupun padat. Contohnya adalah perpindahan zat didalam cairan serta gerakan zat pewarna didalam air. Didalam benda padat (solid) gerakan tersebut dibatasi karena adanya ikatan diantara atom pada keadaan setimbang. Akan tetapi dengan adanya getaran panas (thermal vibration) yang terjadi didalam padatan memungkinkan beberapa atom berpindah. Difusi atom dan paduannya menjadi sangat penting karena kebanyakan reaksi padatan (solid-state reaction) mengikut sertakan gerakan atom.

Kekosongan atau mekanisme substitusi, atom dapat bergerak didalam lapisan kristal ke tempat lainnya jika ada energi aktivasi (*activation energy*) yang cukup untuk menggerakkan atom tersebut. Mekanisme berikutnya adalah mekanisme interstisi (interstitial mechanism), terjadi bila atom-atom bergerak dari suatu celah ke celah lainnya tanpa terjadinya perpindahan atom yang tetap didalam matriks kristal.

Dari kedua mechanism tersebut pemakaiannya di industry telah banyak dilakukan, sebagai contohnya adalah: proses pengerasan permukaan (*case*

*hardening*) dari baja dengan carbon gas (*gas carburizing*). Banyak komponen-komponen yang berputar atau meluncur (*sliding*) dari suatu mesin seperti pada rodagigi (*gears*) dan poros (*shaft*) harus memiliki permukaan yang keras agar tahan terhadap gesekan tetapi bagian dalam yang cukup kuat menahan getaran sehingga tidak mudah retak (*fracture*). Dengan kata lain hanya bagian permukaan saja yang di keraskan untuk mendapatkan sifat kekuatan terhadap gesekan yang tinggi. Komponen-komponen tersebut dapat dilihat pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Komponen-komponen yang mengalami proses gas-carburized.

## **BAB 3**

### **SIFAT MEKANIK LOGAM DAN PADUANNYA**

Objektif:

- a. Mengenal sifat-sifat mekanik logam
- b. Mampu menghitung tegangan yang bekerja pada suatu logam
- c. Mampu mengaplikasikan sifat-sifat yang ada pada material untuk disain dan kayasa.

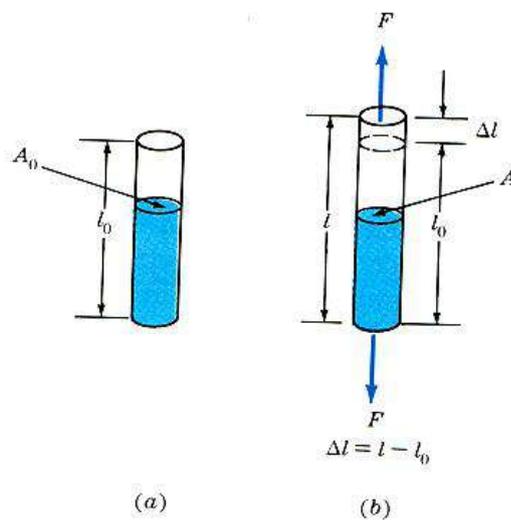
aterial yang sering digunakan pada suatu peralatan atau komponen, secara spesifik pada peralatan pertambangan akan mengalami pembebanan atau adanya gaya yang bekerja. Bila salah dalam melakukan perlakuan (treatment) maka akan menyebabkan kerusakan pada peralatan tersebut. Akibatnya proses produksi akan berhenti dan terjadi kerugian. Oleh karena itu diperlukan pengetahuan dasar tentang sifat material akibat mengalami pmbebanan mekanik, fisik ataupun akibat korosi karena lokasi tempat alat tersebut bekerja.

Untuk mengetahui kekuatan suatu komponen atau material tersebut maka perlu dilakukan pengujian material sehingga diketahui sifat-sifatnya. Standar pengujian telah ada di banyak negara, antara lain: ASTM (*American Society for Testing Materials*) standard, yang dapat dilihat di <http://www.astm.org>, JIS di Jepang, DIN di Jerman atau SNI (Standar Nasional Indonesia). Untuk itu perlu mengeragui prinsip/konsep tentang tegangan dan regangan dikaitkan dengan

pembebanan yang terjadi sehingga dapat diketahui kekuatan material yang digunakan.

### 3.1 Konsep Tegangan dan Regangan.

Bila sepotong logam dikenai beban tarik uniaksial, maka akan terjadi deformasi. Bila logam tersebut kembali ke bentuk semula setelah gaya yang bekerja dilepaskan disebut deformasi elastis. Tetapi bila beban dilepaskan dan panjang logam tidak kembali ke bentuk awal maka peristiwa ini disebut deformasi plastis.



Gambar 3.1. Beban uniaksial. (a) sebelum pembebanan, (b) setelah pembebanan.

Konsep ini merupakan prinsip dasar dalam menghitung kekuatan material, sehingga material dianggap kuat bila beban yang bekerja masih dibawah batas elastisnya.

### 3.2 Tegangan Teknik dan Regangan teknik.

Konsep sederhana dalam menghitung tegangan dan regangan teknik adalah perlu adanya sumbu yaitu bebannya adalah uniaksial seperti pada gambar 3.1.

#### 3.2.1 Tegangan Teknik (*Engineering stress*).

Bila suatu batang silinder dikenai gaya uniaksial  $F$ , maka tegangan teknik didefinisikan sebagai gaya yang bekerja dibagi dengan luas penampang awal:

$$\text{Tegangan teknik } \sigma = \frac{\mathbf{F \text{ (gaya tarik rata-rata uniaxial)}}}{\mathbf{A_0 \text{ (luas penampang awal)}}$$

dimana  $F$  adalah gaya tarik rata-rata uniaxial

Satuan dari tegangan teknik adalah pound per square inch, lbf/in<sup>2</sup> atau psi (USA). Untuk SI N/m<sup>2</sup> atau pascal (Pa). 1 psi = 6.89 X 10<sup>3</sup> Pa.

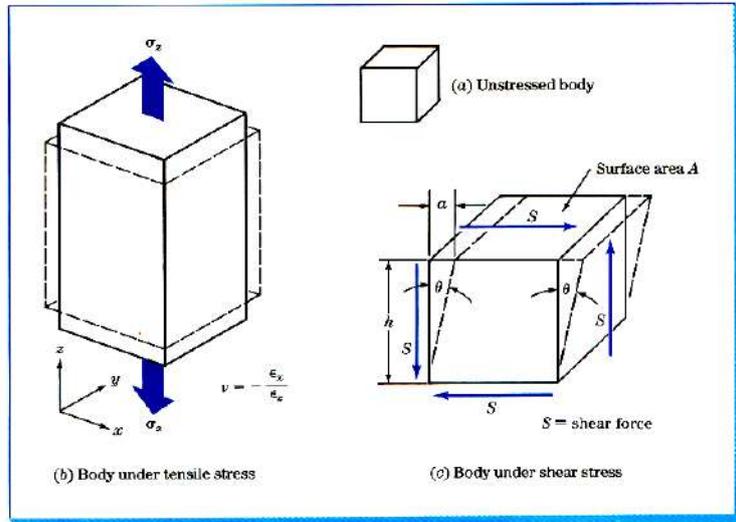
#### 3.2.2 Regangan teknik (*Engineering Strain*)

Regangan teknik didefinisikan sebagai perubahan panjang akibat gaya uniaksial dibagi dengan panjang awal.

$$\nu = - \frac{\varepsilon \text{ (lateral)}}{\varepsilon \text{ (longitudinal)}} = - \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = - \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$

#### 3.2.3 Poisson's Ratio

Lihat gambar 3.2.b, tegangan tarik  $\sigma_z$  menghasilkan regangan aksial  $+\epsilon_z$  dan kontraksi lateral dari  $-\epsilon_x$  dan  $-\epsilon_y$ . Asumsi isotropic material,  $\epsilon_x$  dan  $\epsilon_y$  sama nilainya. Persamaannya:



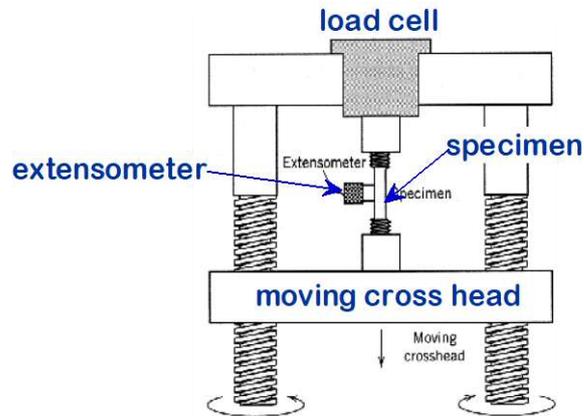
Gambar 3.2 (a) kubus yang tidak dibebani, (b) kubus yang mengalami beban tarik, (c) kubus yang mengalami beban geser.

$$\nu = - \frac{\epsilon \text{ (lateral)}}{\epsilon \text{ (longitudinal)}} = - \frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = - \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

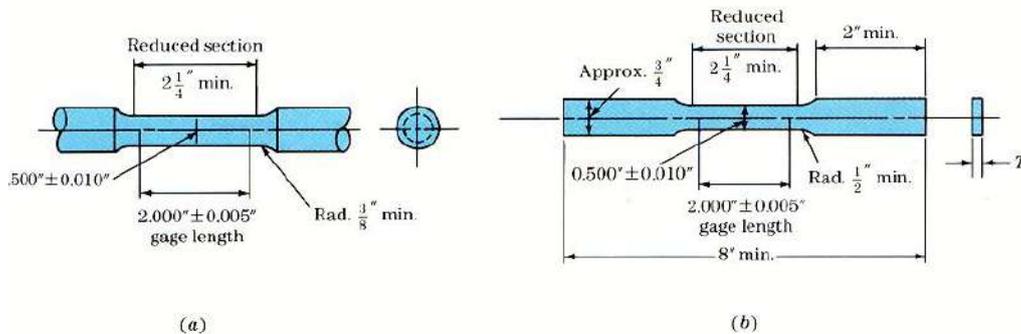
### 3.3 Uji Tarik dan Diagram Tegangan-Regangan Teknik.

Uji tarik digunakan untuk menguji kekuatan logam dan paduannya. Pada pengujian ini logam ditarik sampai putus dengan waktu yang relatif pendek dan

dengan kecepatan yang tetap, seperti pada gambar 3.3. Sedangkan bentuk dan ukuran spesimen dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.3 Ilustrasi skematis mesin uji tarik.



Gambar 3.4 Bentuk dan ukuran spesimen uji tarik. (a) spesimen bulat dan, (b) spesimen plat

Dari hasil uji tarik dapat dihasilkan data-data sbb:

- modulus elastisitas (Modulus of elasticity); kekuatan luluh (yield strength) pada kondisi 0,2 % offset;
- kekuatan tarik maksimum (ultimate tensile strength); dan
- persentase perpanjangan sampai putus.

### 3.3.1 Modulus elastisitas.

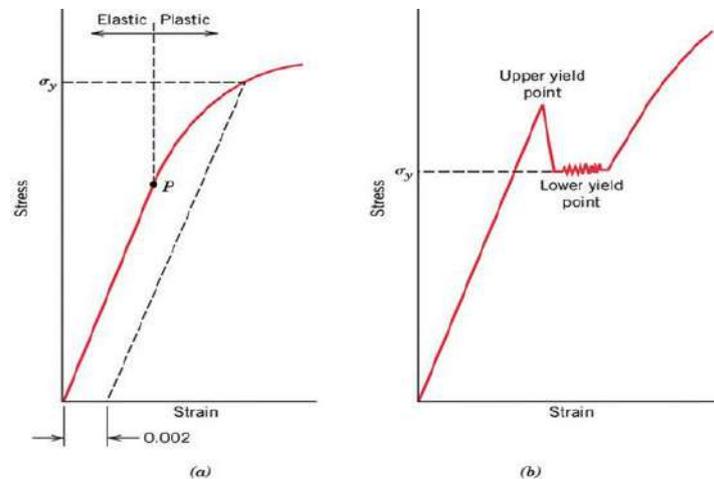
Dibagian awal uji tarik logam akan mengalami deformasi elastis, sehingga jika beban dilepaskan maka spesimen kembali ke bentuk semula. Untuk logam deformasi elastis biasanya kurang dari 5 %. Hukum Hooke's menyebutkan bahwa logam dan paduannya menunjukkan hubungan yang linier antara tegangan dan regangan di daerah elastis,

$$\sigma \text{ (stress)} = E\varepsilon \text{ (strain)} \text{ atau } E = \sigma/\varepsilon \text{ (satunya psi atau Pa)}$$

### 3.3.2 Kekuatan luluh (*Yield strength*).

Kekuatan luluh menjadi batas antara deformasi elastis dan plastis. Pada deformasi elastis material yang mengalami regangan akan kembali ke bentuknya semula apabila gaya yang bekerja padanya dihilangkan. Tidak demikian halnya dengan deformasi plastis, meskipun gaya yang bekerja telah dihilangkan tetapi telah terjadi perubahan bentuk yang permanen dari material tersebut. Kekuatan luluh sangat penting nilainya untuk desain struktur suatu bangunan karena ini adalah batas dimana material akan menunjukkan deformasi plastis. Karena tidak ada titik yang jelas mulai terjadinya deformasi plastis maka deformasi plastis ditentukan mulai dari 0,2 % (khusus untuk USA) terjadinya deformasi elastis seperti pada gambar 4.5. 0,2 % kekuatan luluh disebut juga sebagai 0,2 % offset yield strength yang ditentukan dari diagram tegangan-regangan teknik. Mula-mula tarik garis yang sejajar dengan garis elastis di titik 0,002 in/in kemudian

perpotongan garis tersebut dengan diagram uji tarik akan menghasilkan kekuatan luluhnya. Sedangkan di Inggris digunakan 0,1 % offset.

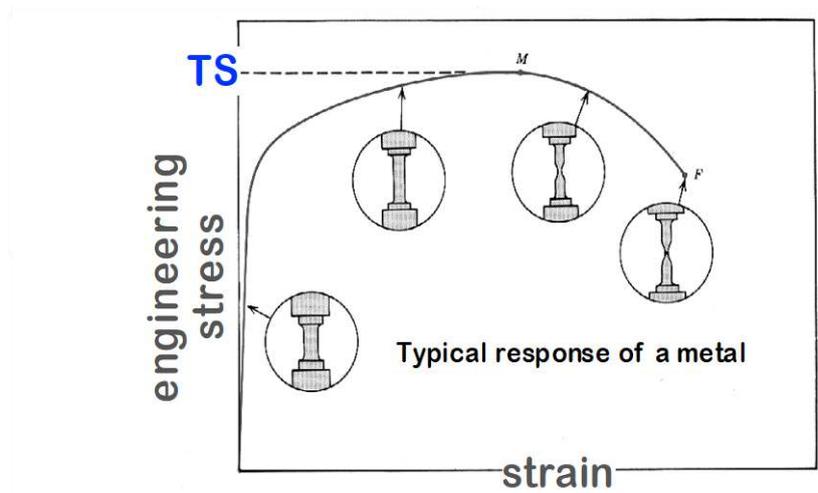


Gambar 3.5 (a) Grafik yang menunjukkan batas deformasi elastis dan plastis, batas luluh menggunakan metode offset 0.002. (b) Fenomena batas luluh yang terjadi pada beberapa jenis baja.

### 3.3.3 Kekuatan tarik maksimum.

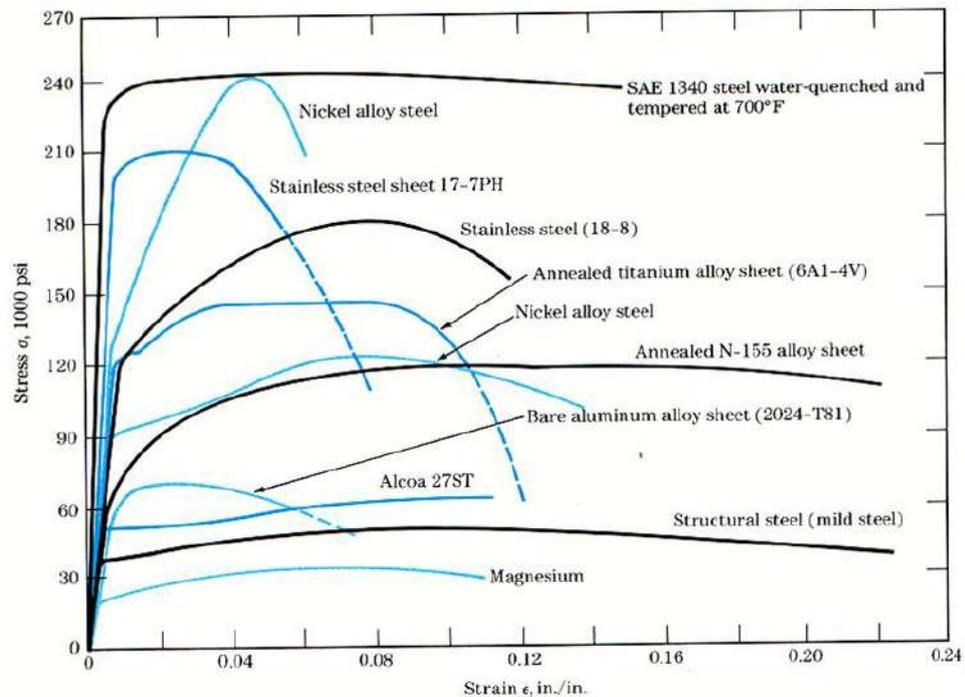
Setelah mencapai kekuatan luluh, deformasi plastis akan terus naik secara kontinu sampai mencapai maksimum yaitu pada titik M digambar 4.6, dan kemudian akan turun sampai putus. Kekuatan tarik maksimum adalah kekuatan maksimum yang dicapai pada kurva engineering stress-strain. Bila regangan terus bertambah maka akan terjadi pengecilan penampang sesaat yang disebut sebagai necking. Dengan terus bertambahnya regangan maka tegangan teknik akan turun sampai spesimen putus. Kekuatan tarik material sangat bervariasi tergantung dari

jenis dan paduannya, mulai dari 50 MPa (7000 psi) untuk aluminium sampai dengan 3000 MPa (450.000 psi) untuk baja kekuatan tinggi (*high-strength steels*).



Gambar 3.6 Ilustrasi specimen uji Tarik, melewati batas luluh (yield), sampai terjadi pengecilan penampang sesaat (necking), dan akhirnya putus.

Untuk paduan yang bersifat liat (*ductile*) kekuatan tarik maksimum tidak dipakai pada perhitungan disain karena terlalu banyak deformasi plastis yang terjadi sebelum putus. Oleh karena itu untuk tujuan disain konstruksi maka kekuatan luluh lah yang dipakai sebagai dasar perhitungan kekuatan material. Jika di dalam logam banyak terdapat porositas atau inklusi maka kekuatan tarik maksimumnya akan lebih kecil dibandingkan keadaan yang normal. Gambar 4.6 menunjukkan kurva tegangan dan regangan teknik beberapa paduan logam.



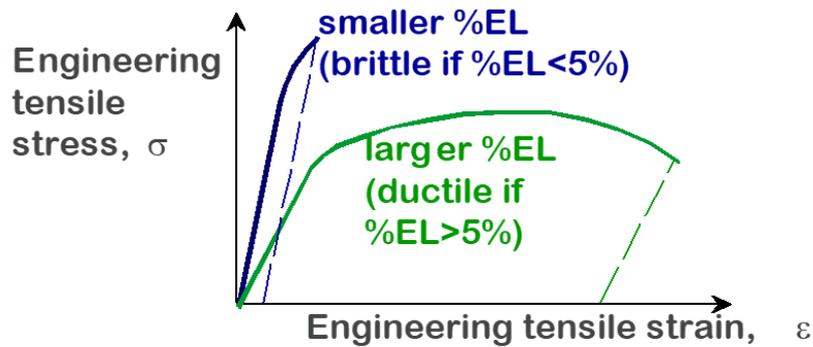
Gambar 4.7 Kurva tegangan dan regangan teknik dari logam dan paduan logam.

### 3.3.4 Keuletan (*Ductility*).

Keuletan merupakan salah satu sifat mekanik yang penting, karena mengukur besarnya deformasi plastis yang terjadi pada material sebelum putus. Material yang memiliki keuletan yang sangat kecil atau tidak memiliki deformasi plastis sama sekali disebut sebagai material getas (*brittle*). Sifat liat dan getas suatu material diilustrasikan pada gambar 4.7. Pentingnya keuletan dapat dilihat pada dua sisi, yaitu pertama sebagai petunjuk bagi disainer untuk menentukan bahwa telah terjadi deformasi plastis sebelum struktur tersebut putus, dan kedua secara spesifik memberikan kelonggaran terjadinya deformasi saat fabrikasi. Keuletan dapat dinyatakan secara kuantitatif sebagai prosentasi perpanjangan (*percent elongation*), % EL, atau prosentasi pengurangan luas penampang (*percent reduction area*) % RA.

$$\% EL = (l_f - l_o) / l_o \times 100\% \quad \text{dan} \quad \% AR = (A_o - A_f) / A_f \times 100\%$$

Material dinyatakan getas (*brittle*) apabila memiliki regangan putus (fracture strain) kurang dari 5%. Gambar 4.8 diagram uji Tarik untuk material getas (*brittle*) dan material ulet (*ductile*).



Gambar 3.8. Hasil uji Tarik material getas dan material Ulet

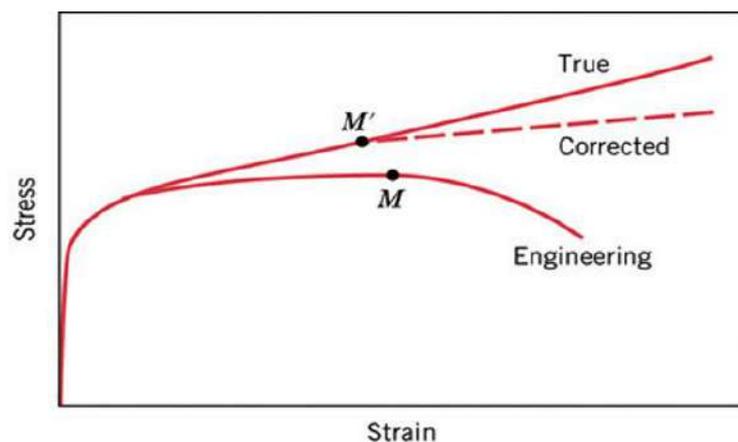
### 3.4 Tegangan Sebenarnya dan Regangan Sebenarnya.

Bila diamati gambar 3.6 menyatakan bahwa saat tegangan mencapai maksimum maka sepertinya material tersebut menjadi turun kekuatannya dengan bertambahnya regangan. Akan tetapi pada kenyataannya yang terjadi sebaliknya yaitu dengan semakin bertambahnya regangan maka tegangan akan terus naik. Hal ini disebabkan telah terjadi penurunan luas penampang di daerah necking dimana deformasi terjadi, sehingga menurunkan beban yang “ditangkap” oleh sensor load cell pada mesin uji Tarik. Fenomena ini disebut sebagai fenomena yang terjadi pada uji tarik sehingga perlu dikoreksi hasil uji Tarik hasil pengujian dengan kondisi aktual yang terjadi.

Dengan demikian persamaan  $\sigma = F/A_0$  menjadi tidak berlaku setelah (fenomene pengecilan penampang sesaat (*necking*) terjadi. Tegangan teknik dinyatakan sebagai:  $\sigma_T = F/A_i$  dimana  $A_i$  adalah luas penampang sesaat.

Regangan teknik dinyatakan sebagai:  $\epsilon_T = \ln (l_i / l_0)$ . Jika tidak ada perubahan volume selama berlangsungnya deformasi maka:  $A_i l_i = A_0 l_0$ , sehingga hubungan antara tegangan regangan sebenarnya dan tegangan regangan teknik adalah:  $\sigma_T = \sigma (1 + \epsilon)$  dan  $\epsilon_T = \ln (1 + \epsilon)$

Persamaan diatas hanya dipakai bila setelah terjadi pengecilan penampang sesaat (*necking*). Ilustrasi antara tegangan regangan sebenarnya dengan tegangan regangan teknik dapat dilihat pada gambar 3.9.



Gambar 3.9. Ilustrasi perbandingan antara tegangan sebenarnya dengan tegangan teknik.

Untuk beberapa logam dan paduan kurva tegangan-regangan sebenarnya mulai dari saat terjadinya deformasi plastis sampai dengan titik dimana mulai terjadi necking dapat didekati dengan persamaan  $\sigma_T = K \epsilon_T^n$ , dimana K dan n

adalah konstanta, yang nilainya bervariasi tergantung dari jenis paduannya dan kondisi dari material seperti telah mengalami deformasi plastis sebelumnya, perlakuan panas dan lain-lain. parameter  $n$  sering juga disebut sebagai eksponen pengerasan regangan (strain hardening exponent) tanpa dimensi.

### 3.5 Kekerasan (*Hardness*).

Kekerasan adalah kemampuan material menahan deformasi plastis. Kekerasan tersebut diukur melalui gaya yang bekerja pada indenter dipermukaan logam. Indenter terbuat dari material yang lebih keras dari material yang akan diuji dan biasanya berbentuk bola, piramid atau kerucut. Prosedur pengujian biasanya dimulai dari memberikan beban yang telah diketahui besarnya secara perlahan-lahan dalam arah tegak lurus permukaan logam yang akan diuji. Setelah dilakukan penekanan maka akan menimbulkan bekas penekanan pada logam uji. Untuk mesin yang masih manual bekas penekanan tersebut yang akan diukur, sedangkan untuk saat ini nilai kekerasan dapat langsung dibaca pada mesin uji keras. Tabel 4.3, menunjukkan jenis-jenis uji keras. Kekuatan tarik dan kekerasan merupakan tanda ketahanan suatu logam terhadap deformasi plastis. Konsekuensinya kekuatan berbanding lurus dengan kekerasan suatu material. Untuk kebanyakan baja hubungan antara kekerasan Brinell (HB) dengan kekuatan tarik adalah:

$$TS \text{ (MPa)} = 3,45 \times HB \quad \text{atau} \quad TS \text{ (psi)} = 500 \times HB$$

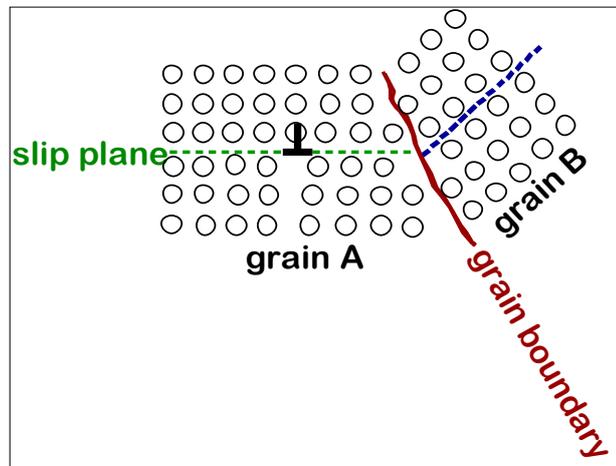
### **3.6 Mekanisme Penguatan Logam.**

Prinsip dasar yang penting pada mekanisme penguatan logam adalah hubungan antara gerakan dislokasi dengan sifat-sifat mekanik suatu logam. Secara makroskopik deformasi plastis sangat berhubungan dengan gerakan dislokasi dalam jumlah besar. Dengan demikian kemampuan suatu logam untuk berdeformasi plastis sangat tergantung pada kemampuan gerakan dislokasi. Semakin sulit dislokasi bergerak maka logam tersebut semakin sulit mengalami deformasi plastis. Material yang kuat dan keras diakibatkan oleh sulitnya dislokasi bergerak. Berikut ini beberapa teknik penguatan logam dengan menggunakan prinsip menghambat gerakan dislokasi. Beberapa teknik penguatan logam tanpa menambahkan unsur paduan lainnya akan dibahas berikut ini.

#### **3.6.1 Ukuran Butir.**

Ukuran butir atau diameter rata-rata butir didalam logam polikristalin akan mempengaruhi sifat-sifat mekanik logam tersebut. Antara butir yang satu dengan butir yang lainnya umumnya memiliki orientasi dan arah butir yang berbeda. Selama proses deformasi plastis, apabila dislokasi telah mencapai batas butir maka dislokasi tersebut akan terus bergerak memotong butir berikutnya. Perubahan arah dan orientasi bidang slipnya akan memerlukan energi yang lebih besar agar dislokasi dapat terus bergerak. Dalam hal ini batas butir menjadi penghalang untuk Bergeraknya dislokasi ke butir berikutnya. Dengan demikian apabila jumlah butir semakin banyak (butir semakin kecil) maka material tersebut akan semakin kuat dan keras. Gambar 3.10 mengilustrasikan gerakan dislokasi saat mencapai batas

butir. Material dengan ukuran butir yang halus/kecil akan lebih kuat dan keras dibandingkan material yang memiliki ukuran butir besar/kasar.



Gambar 3.10 Ilustrasi gerakan dislokasi pada bidang slipnya dan perubahan arah saat mencapai batas butir untuk bergerak ke butir berikutnya.

Kebanyakan logam, memiliki hubungan antara kekuatan luluh (*yield strength*) dengan  $\sigma_y$  dengan ukuran butir dapat didekati dengan persamaan Hall-

Petch:

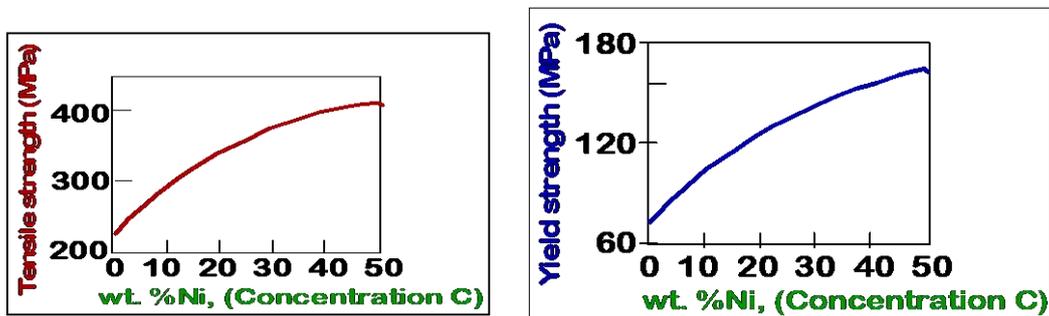
$$\sigma_{yield} = \sigma_o + k_y d^{-1/2}$$

Dari persamaan ini terlihat bahwa kekuatan luluh berbanding terbalik dengan ukuran butirnya. Dengan demikian ukuran butir makin kecil maka logam tersebut makin kuat.

### 3.6.2 Penguatan dengan Cara Larutan Padat (*Solid-Solution Strengthening*)

Teknik lain untuk menaikkan kekuatan logam adalah melakukan pemaduan dengan atom lainnya dengan cara substitusi atau interstisi (*interstitial*) pada larutan padat. Cara ini disebut sebagai penguatan larutan padat (*solid-solution strengthening*). Logam dengan kemurnian yang tinggi (tanpa paduan) pada umumnya lebih lunak dan tidak kuat dibandingkan dengan logam paduan dengan

unsur dasar yang sama. Kenaikan konsentrasi kandungan substitusi atau interstisi dari atom lainnya akan menaikkan kekuatan dan batas luluh material tersebut secara signifikan seperti ditunjukkan pada gambar 3.11.

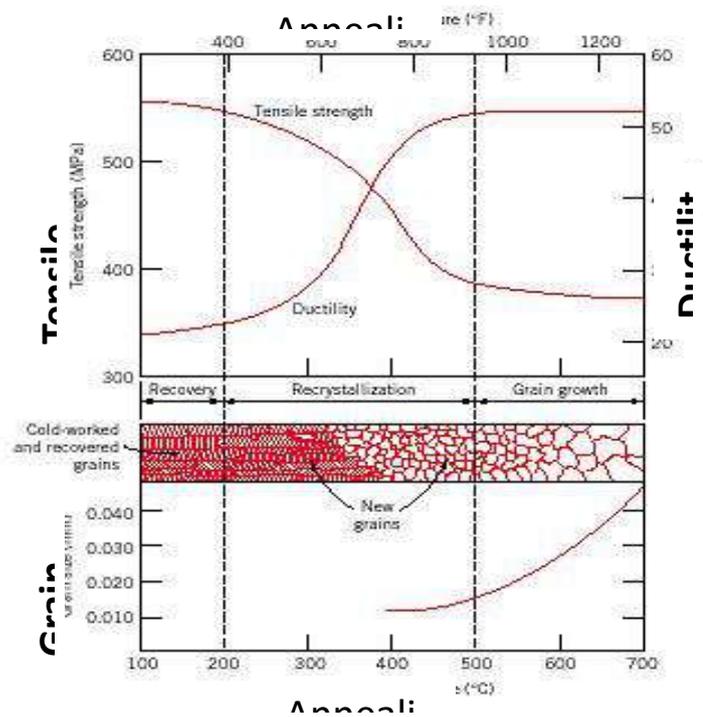


Gambar 3.11 Paduan Ni dan Cu. Kenaikan kandungan Ni akan menaikkan kekuatan luluh dan kekuatan tarik paduan tersebut.

#### 4.5.3 Recovery, Rekristalisasi dan Pertumbuhan Butir (*Grain Growth*).

Selama proses fabrikasi logam dan paduan kadang-kadang perlu dipanaskan kembali untuk melunakkannya dan menaikkan keuletannya. Jika logam yang telah mengalami proses pengerjaan dingin (cold-worked) dipanaskan mencapai temperatur yang cukup maka logam tersebut akan mengalami perubahan mulai dari recovery, rekristalisasi (recrystallization) dan kemudian akan diikuti dengan pertumbuhan butir (grain growth). Gambar 3.12 menunjukkan secara skematik adanya perubahan struktur akibat dari kenaikan temperatur dan diikuti dengan perubahan sifat-sifat mekaniknya. Selama proses recovery energi regangan akibat proses pengerjaan dingin akan terlepas bersamaan dengan gerakan dislokasi, sebagai akibat dari peningkatan difusi atom pada temperatur tinggi (elevated-temperature). Gerakan dislokasi ini terjadi meskipun tidak ada gaya dari luar yang dikenakan. Setelah proses recovery selesai maka akan terjadi rekristalisasi, dimana

pada formasi yang baru ini telah terbebas dari energi regangan dan terbentuknya butir yang baru berbentuk sama (equiaxed). Pada proses selanjutnya maka akan terbentuk butir yang baru dimulai dari pengintian dan akan terus tumbuh menjadi besar. Proses perlakuan panas dengan tujuan melunakkan logam ini, disebut proses aniling (annealing), dengan pembagian aniling sebagian (partial anneal) dan aniling penuh (full-anneal) yang sering digunakan untuk menunjukkan tingkat kelunakan logam tersebut setelah dipanaskan.



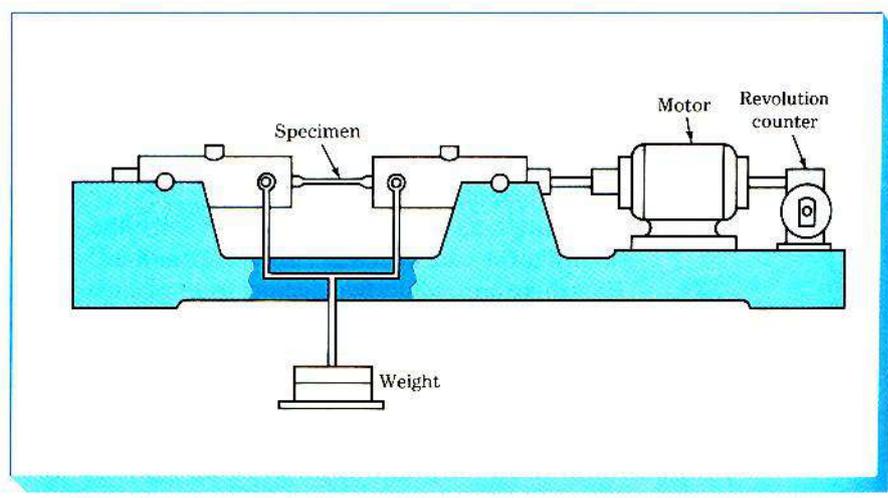
Gambar 3.12 Pengaruh annealing pada perubahan struktur dan sifat mekanik logam yang mengalami proses pengerjaan dingin (*cold-worked*).

### 3.7 Kelelahan Logam.

Kelelahan (*fatigue*) adalah bentuk suatu kegagalan akibat adanya beban dinamik (bolak-balik) dan berfluktuasi, contohnya pada struktur jembatan, sayap

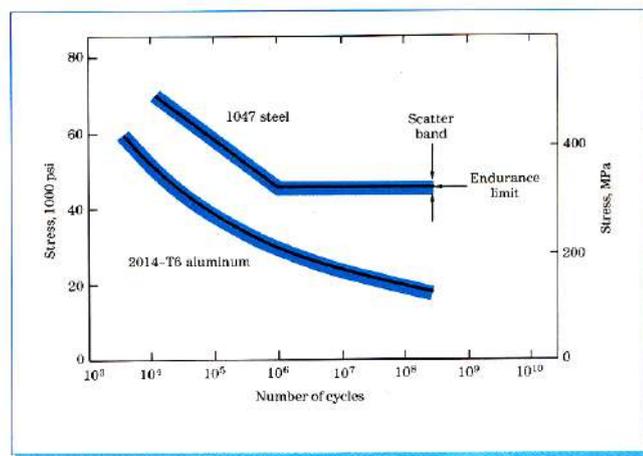
pesawat terbang, komponen mesin seperti rodagigi, poros, dan (batang torak) connecting rods. Pada kondisi tersebut kemungkinan akan terjadi kegagalan ada meskipun tegangan yang bekerja dibawah tegangan tarik atau luluhnya bila pada saat beban statis. Lelah kebanyakan menjadi penyebab utama kegagalan suatu logam, mendekati 90% dari semua kegagalan logam/metal, polimer dan keramik kecuali kaca. Beberapa kegagalan akibat lelah kadang-kadang terjadi dengan cepat tanpa disertai tanda-tanda sebelumnya. Tegangan yang menyebabkan terjadinya kegagalan ini disebut (*fatigue failure*).

Kegagalan fatigue dimulai dari pengintian dimana terjadi konsentrasi tegangan seperti pada radius yang kecil/sempit, ujung yang tajam, ataupun adanya takikan (notch) kemudian terjadi perambatan retak dan akhirnya akan putus/gagal. Selama proses perambatan ini akan ditandai dengan adanya ‘garis pantai’(beach mark) pada permukaan patah dari material yang bersangkutan. Guna mengetahui umur lelah material perlu dilakukan pengujian. Salah satu metode pengujian yang banyak digunakan untuk mengetahui umur fatigue adalah seperti pada gambar 3.13.



Gambar 3.13. Skema pengujian lelah (fatigue).

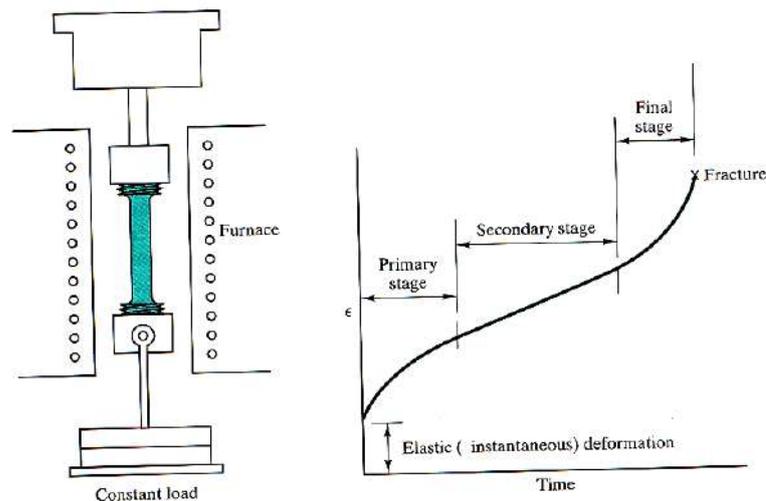
Data dari pengujian lelah di cetak kedalam kurva yang disebut “SN curve” yang terdiri dari tegangan (S) dan siklus (N). Untuk aluminium dan paduannya tegangan yang mengakibatkan putus menurun dengan naiknya jumlah siklus. Sedangkan untuk baja karbon pertama-tama terjadi penurunan tegangan fatigue dengan kenaikan siklus, tetapi kemudian tidak terjadi penurunan kekuatan fatigue meskipun siklus meningkat. Peristiwa ini disebut “endurance limit” dan terletak diantara jumlah siklus  $10^6$  dan  $10^{10}$ . Kebanyakan paduan ferro memiliki harga endurance limit sebesar setengah dari tegangan tariknya. Sedangkan non ferro dan paduannya tidak memiliki endurance limit, dan biasanya kekuatan fatigue-nya dibawah 1/3 kekuatan tarik (tensile strength). Gambar 4.18 menunjukkan kurva SN pada baja dan aluminium Banyak faktor yang mempengaruhi umur lelah suatu komponen rekayasa antara lain: tingkat tegangan rata-rata yang bekerja; variable metalurgi (inklusi, unsur paduan dll), termasuk didalamnya kondisi lingkungan; kekasaran permukaan akibat proses permesinan; proses perlakuan permukaan (*surface treatment*); faktor disain suatu komponen/mesin dan lain-lainnya.



Gambar 3.14 Tegangan vs jumlah siklus (S-N curve) pada Al dan baja.

### 3.8 Mulur (*Creep*) pada Temperatur Tinggi.

Uji tarik pada temperatur kamar tidak mampu memprediksi sifat mekanik suatu logam apabila dikenai beban pada temperatur tinggi. Yang dimaksud dengan temperatur tinggi (elevated temperature) adalah apabila temperatur yang bekerja  $1/3$  s/d  $1/2$  kali temperatur cair absolut material yang bersangkutan. Dengan demikian mulur dapat didefinisikan sebagai deformasi plastis yang terjadi pada temperatur tinggi akibat adanya beban selama selang waktu tertentu. Gambar 3.15 menunjukkan cara pengujian creep dan kurva yang dihasilkan dari pengujian tersebut. Kurva creep dapat dibagi kedalam tiga bagian, yaitu : primary stage yang ditandai dengan adanya penurunan laju regangan, secondary stage berupa garis lurus dan laju regangan yang tetap, dan yang terakhir tertiary stage adanya peningkatan laju regangan sampai akhirnya putus.



Gambar 3.15 Sketsa pengujian creep dan kurva yang dihasilkan.

## **BAB 4**

### **PADUAN LOGAM FERRO DAN NON FERRO**

Objektif:

- a. Mengetahui jenis-jenis paduan logam ferrous dan non ferrous.
- b. Mengetahui sifat-sifat paduan logam.
- c. Mampu mengaplikasikan paduan logam pada desain dan rekayasa.

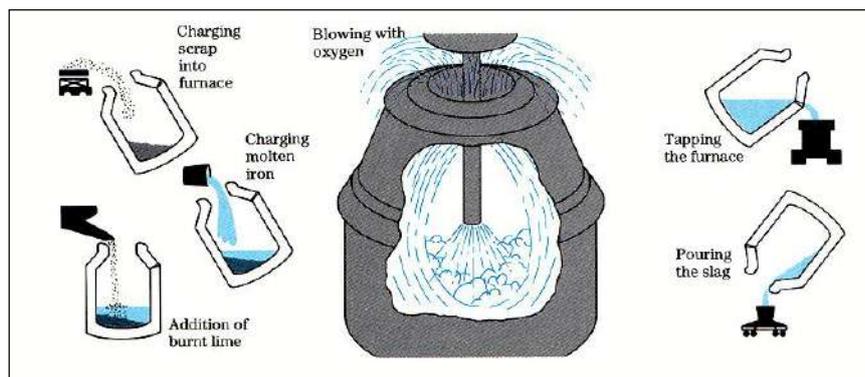
Logam dan paduannya sangat banyak dipakai pada produk-produk teknik dan desain teknik, secara spesifik unsur besi dan unsur paduannya yang lebih dikenal dengan baja adalah yang paling banyak digunakan dan diproduksi karena harga yang relatif murah serta adanya kombinasi dari kekuatan, ketangguhan (*toughness*) dan keuletan yang tinggi dengan biaya produksi yang relatif rendah. Paduan yang bahan dasarnya besi disebut juga paduan ferrous termasuk besi cor, sedangkan paduan yang bahan dasarnya bukan besi disebut paduan non ferrous.

#### **4.1 Pembuatan Besi dan Baja.**

Kebanyakan proses pembuatan besi diekstraksi dari bijih besi di dalam tanur pengolahan baja (*blast furnace*) seperti yang terlihat pada gambar 54.1. Di dalam tanur, karbon (*coke*) berfungsi sebagai pereduksi untuk mereduksi besi oksida ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) untuk menghasilkan besi kasar (*pig iron*) yang mengandung 4 % karbon, dengan reaksi sbb:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$

Besi kasar (dalam bentuk cair) inilah yang akan diubah menjadi bahan dasar pembuatan baja, setelah menurunkan kandungan karbonnya.

Baja karbon tanpa campuran unsur lainnya (*Plain carbon steel*) adalah paduan besi yang sangat penting, dengan kandungan karbon mencapai 1,2 % sampai dengan 2%. Akan tetapi pada umumnya baja mengandung karbon kurang dari 0,5 %, karena bila kandungan karbon terlalu tinggi akan menyebabkan baja



tersebut cenderung getas. Kebanyakan baja dibuat dengan cara memasukkan oksigen murni kedalam besi kasar (*pig iron*) untuk mengurangi kandungan karbon sampai batas yang diinginkan. Disamping itu perlu juga dilakukan proses pengurangan zat-zat lain yang tidak dikehendaki yang juga disebut dengan pengotor (*impurities*). Proses penambahan oksigen ini disebut sebagai *basic-oxygen process*. Gambar 5.2 menunjukkan tungku proses basic-oxygen.

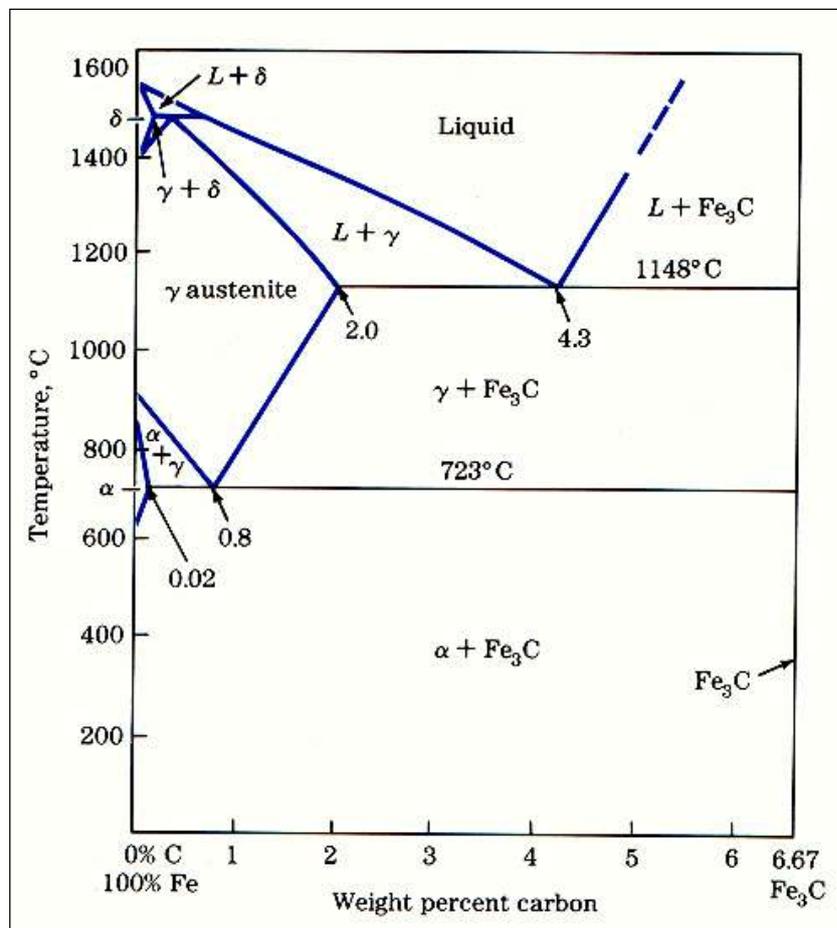
Gambar 4.1. Ilustrasi pembuatan baja didalam tungku basic-oxygen.

#### 4.2 Diagram Fasa Besi-Besi Carbida.

Baja memiliki kandungan unsur-unsur seperti: karbon mulai dari 0,03% sampai sekitar 1,2%, 0, 25% sampai 1 % Mn dan sejumlah kecil unsur-unsur lain

seperti: Si, P dll. Baja dengan kondisi seperti ini disebut sebagai plain carbon steel. Diagram fasa dibuat dengan laju pendinginan yang sangat lambat, dengan berbagai temperatur dan kandungan karbon mencapai maksimal 6,67%. Gambar 4.2 diagram fasa besi karbon. Adapun iagram Fe-Fe<sub>3</sub>C terdiri dari fasa padat sbb:

- a.  $\alpha$  ferrite : carbon larut padat interstisi didalam struktur kristal BCC. Kelarutan korbon pada fasa ini mencapai max. 0,02% pada temperatur 723 0C. Kelarutan carbon di  $\alpha$  ferrite akan turun mencapai 0,005% pada temperatur 0 0C.



gambar 4.2. Diagram gasa Besi - Karbon

Austenite ( $\gamma$ ), karbon larut padat interstisi didalam besi  $\gamma$ . Austenite memiliki struktur kristal FCC dan memiliki kemampuan larut padat dari karbon lebih tinggi dari  $\alpha$  ferrite. Kelarutan karbon di austenite maksimum 2,08 % pada temperatur 1148 °C dan menurun menjadi 0,8 % pada temperatur 723 °C.

- Cementite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) memiliki kelarutan tak terbatas dan komposisinya adalah carbon mulai dari 6,67 % s/d 93,3 % Fe. Cementite keras dan getas.
- $\delta$  ferrite, adalah karbon larut padat interstisi didalam besi  $\delta$ , yang memiliki struktur kristal BCC seperti  $\alpha$  ferrite. Larutan padat dari karbon pada  $\delta$  ferrite maksimum mencapai 0,09 %, pada temperatur 1465 °C.

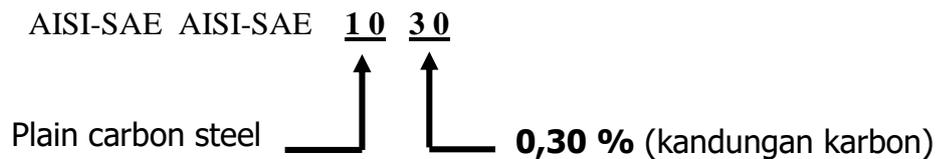
### 4.3 Baja Plain Karbon.

Baja plain karbon biasanya memiliki penamaan (coding) sebanyak 4 digit yang didasarkan pada AISI-SAE (*American Iron & Steel Institute- Society for Automotive Engineers*).

Dua digit pertama = 1 0 menunjukkan plain karbon steel.

Dua digit terakhir = X X menunjukkan kandungan karbon nominal dibagi seratus dalam %.

Contoh:



semua baja plain carbon mengandung Mn yang berfungsi untuk menaikkan kekuatannya, dan kadarnya antara 0,3% s/d 0,95%. Baja plain karbon biasanya juga mengandung unsur-unsur lain seperti sur, posfor, silikon dan lain-lain, dalam hal ini disebut sebagai ketidak-murnian (impurities). Sifat mekanis dari beberapa baja plain carbon dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Sifat Mekanis dan Pemakaiannya dari Beberapa Baja Plain Carbon

Alloy AISI-SAE number	chemical composition wt %	Condition	Tensile strength		Yield strength		Elong- ation (%)	Typical applications
			ksi	MPa	ksi	MPa		
1010	0,10 C, 0,40 Mn	hot-rolled	40-60	276-414	26-45	179-310	28-47	sheet % & strip for drawing; wire, rod, & nails & screw; concrete reinforcement bar
		cold rolled	42-58	290-400	23-38	159-262	30-45	
1020	0,20 C, 0,45 Mn	As rolled	65	448	48	331	36	Steel plate & structural sections; shafts, gears
		Annealed	57	393	43	297	36	
1040	0,40 C, 0,65 Mn	As rolled	90	621	60	414	25	Shafts studs, High tensile-tubing, gears
		Annealed	75	517	51	352	30	
		Tempered*	116	800	86	593	20	
1060	0,60 C, 0,65 Mn	As rolled	118	814	70	483	17	Spring wire, forging dies, railroad wheels
		Annealed	91	628	54	483	22	
		Tempered*	160	110	113	780	13	
1080	0,80 C, 0,4 Mn	As rolled	140	967	85	586	12	music wire, helical spring, cold chisels, forging dies blocks
		Annealed	89	614	54	373	25	
		Tempered*	189	1304	142	980	12	
1095	0,95 C, 0,4 Mn	As rolled	140	966	83	573	9	Dies, punches, taps, milling
		Annealed	95	655	55	379	13	
		Tempered*	183	1263	118	814	10	cutter, shear blades, high- tensile wire

Baja plain carbon dengan kandungan karbon yang sangat rendah mempunyai kekuatan tarik yang relatif rendah tetapi keuletan yang tinggi dan sebaliknya, bila kandungan karbon makin tinggi. Baja seperti ini biasanya dibuat

dalam bentuk lembaran (sheet) dan kebanyakan dipakai sebagai bodi pada kendaraan bermotor. Baja plain carbon medium (1020-1040) banyak dipakai untuk poros dan rodagigi. Sedangkan baja plain carbon tinggi (1060-1095) digunakan untuk pegas, blok cetakan (die block), pisau potong (cutter), dan pisau potong putar (shear blades).

#### **4.4 Paduan Logam Fero (*Ferrous Alloys*).**

Paduan logam fero adalah paduan dengan unsur utamanya besi (Fe), yang diproduksi dengan jumlah yang lebih besar dibandingkan dengan jenis logam lainnya. Penggunaan yang luas tersebut di dasarkan pada 3 faktor yaitu:

- a. Terdapat dalam jumlah yang sangat banyak dipermukaan bumi,
- b. relatif murah dalam proses pembuatannya, mulai dari penambangan sampai siap untuk digunakan,
- c. memiliki sifat-sifat mekanik maupun fisik yang sangat luas.

Dari banyak sifat-sifat yang menguntungkan akan tetapi juga memiliki kelemahan yaitu sangat rentan terhadap serangan korosi.

##### **4.4.1 Baja Paduan Rendah (*Low Alloy Steels*).**

Baja adalah paduan dengan unsur utamanya besi (Fe) dan karbon (C). Paduan baja berjumlah ribuan dengan komposisi dan atau perlakuan panas yang

berbeda. Sifat mekaniknya sangat sensitif terhadap kandungan karbon, biasanya kurang dari 1% beratnya. Baja digolongkan kedalam 3 golongan utama berdasarkan kandungan karbonnya, yaitu: baja karbon rendah, sedang dan tinggi. Penggolongan lainnya didasarkan unsur paduan lain selain karbon. Baja yang hanya terdiri dari unsur besi dan karbon sering disebut sebagai baja plain Carbon sedangkan unsur lainnya yang ada merupakan residu, kecuali mangan (Mn) dalam jumlah yang kecil.

#### **4.4.1.1 Baja Karbon Rendah (Low Carbon Steels).**

Baja paduan rendah biasanya mengandung karbon kurang dari 0,25% berat dan sangat sulit untuk di lakukan proses perlakuan panas karena martensit tidak akan terbentuk. Konsekuensinya baja karbon rendah memiliki keuletan (ductility) dan ketangguhan (toughness) yang tinggi. Struktur mikro terdiri dari ferit dan perlit, serta memiliki sifat mampu mesin (machinability) yang baik, dan mampu las (weldability) yang baik.

Baja karbon steel dapat digunakan dengan baik bila kekuatan dan syarat teknis lainnya tidak terlalu besar. Keuntungan yang utama adalah harga yang relatif murah, tetapi keterbatasannya adalah sbb:

- Kekuatannya tidak dapat mencapai 100.000 psi (690 MPa).
- Untuk ukuran besar tidak dapat dihasilkan struktur /fasa martensit sehingga sulit untuk dikeraskan.
- Ketahanan oksidasi dan korosi yang rendah.

- Baja karbon medium harus diquench dengan cepat agar dihasilkan struktur martensit akibatnya dapat terjadi distorsi dan keretakan pada saat di proses perlakuan panas.
- Memiliki ketahanan yang rendah pada temperatur rendah.

Penggunaan baja karbon rendah adalah pada komponen dan bodi mobil, profil untuk struktur seperti: profil I dan H, Profil C dan besi siku dan baja lembaran (sheet metal) yang digunakan pada pembuatan pipa, bangunan, jembatan, dan kaleng minuman. Kelompok lain dari baja karbon rendah adalah HSLA (high strength low alloy), dimana unsur-unsur paduannya terdiri dari: Cu, V, Ni, dan Mo, serta jumlahnya tidak lebih dari 10% berat. HSLA memiliki kekuatan yang lebih besar dibandingkan dengan baja plain carbon, bahkan sebagian dari kelompok HSLA dapat di proses perlakuan panas. Kekuatan luluh-nya dapat mencapai 70000 psi (480 MPa) dan pada kondisi lingkungan yang normal HSLA lebih tahan terhadap korosi dibandingkan dengan baja plain carbon. Penggunaan HSLA antara lain pada: jembatan, menara (tower), kolom pada gedung tinggi, dan bejana bertekanan (pressure vessel). Tabel 4.2 menunjukkan sifat mekanik beberapa jenis HSLA.

Tabel 4.2 Komposisi Beberapa Unsur Paduan pada HSLA

AISI/SAE Atau ASTM	UNS	Komposisi (% berat)		
		C	Mn	unsur lainnya
A440	KI2810	0.28	1.35	0.30 Si (max), 0.20 Cu (min)
A633 Grade E	KI2002	0.22	1.35	0.30 Si, 0.08 V, 0.02 N, 0.03 Nb
A656 Grade I	KI1804	0.18	1.60	0.60 Si, 0.1 V, 0.20 Al, 0.015 N

#### **4.4.1.2 Baja Karbon Sedang (*Medium Carbon Steels*).**

Baja karbon sedang mengandung karbon dengan konsentrasi antara 0,2% - 0,5% beratnya. Paduan ini dapat diproses perlakuan panas dengan cara austenizing, celup cepat (quenching) yang diikuti dengan tempering untuk memperbaiki sifat-sifat mekaniknya. Baja plain carbon sedang ini memiliki mampu keras yang rendah, sehingga untuk mendapatkan hasil perlakuan panas yang baik hanya dapat dilakukan untuk benda yang tipis dan laju pendinginan yang cepat. Penambahan crom (Cr), nikel (Ni) dan malibdenum (Mo) akan menaikkan kemampuannya untuk dapat diproses perlakuan panas. Baja karbon sedang banyak dipakai pada roda rel kereta api, rodagigi, serta komponen mesin lainnya dan komponen struktur yang mensyaratkan kombinasi dari kekuatan, ketahanan terhadap gesekan dan ketangguhan yang tinggi.

#### **4.4.1.3 Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steels*).**

Baja karbon tinggi biasanya mengandung karbon antara 0,6% - 1,4% beratnya, memiliki sifat yang paling keras, paling kuat dan keuletan yang paling rendah diantara baja plain karbon lainnya. Baja ini biasanya dipakai setelah mengalami proses pengerasan dan temper, secara khusus pada penggunaan ketahanan gesek yang tinggi, dan pisau potong (cutting tools). Alat-alat potong dan cetakan baja (dies steel) biasanya terbuat dari baja karbon tinggi dengan penambahan unsur lain seperti krom, vanadium, tungsten dan molibdenum sehingga menjadikannya sangat keras dan kuat serta memiliki ketahanan terhadap

gesekan yang tinggi. Tabel 4.4 menunjukkan 6 jenis baja perkakas dan pemakaiannya di industri manufaktur

Tabel 4.4 Komposisi, dan pemakaian baja perkakas.

Nomor	Nomor	Komposisi (% berat)						Pemakaiannya
		C	W	Mn	Cr	V	Other	
WI	T723 01	0,6- 1,4						Blacksmith tool, tool untuk pekerjaan kayu
SI	T419 01	0,5	2,5 0		1,50			pipa, cutter, pahat drill beton
OI	T315 01	0,90	0,5 0		0,50		1,00 Mn	Shear blades, cutting tools
A2	T301 02	1,00		1, 0	5,00			Punches, embossing dies
D2	T304 02	1,5		1, 0	12,0 0	1,0 0		Cutlery, drawing dies
MI	T113 01	0,85	1,5	8, 5	4,00	1,0 0		Drills, gergaji, tool untuk mesin bubut dan planer

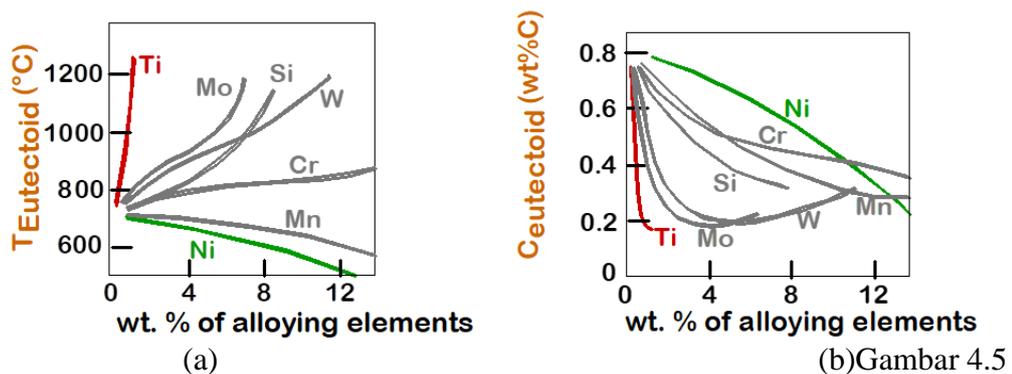
#### 4.4.2 Baja Paduan Tinggi (*High Alloy steels*).

Dari keterbatasan-keterbatasan tersebut diatas perlu dilakukan suatu penggabungan (alloying) dengan unsur-unsur lainnya sehingga, sehingga dapat memperbaiki sifat-sifatnya. Proses pemaduan baja pada umumnya lebih mahal dibandingkan dengan baja plain carbon, tetapi agar sesuai dengan syarat-syarat teknis yang diinginkan maka proses pemaduan harus dilakukan.

Unsur-unsur paduan utama yang ditambahkan antara lain: Mn, Ni, Cr, Mo, Tungsten (W). Unsur-unsur lain yang kadang-kadang ditambahkan antara lain: V, Co, B, Cu, Al, Sn, Ti, Nb. Penambahan unsur-unsur tersebut pada diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C keberadaannya perlu dilakukan penyesuaian terhadap kandungan karbon, yang sering juga disebut sebagai carbon equivalent. Tabel 5.5 menunjukkan komposisi paduan dari beberapa jenis baja paduan dan standard penamaan menurut AISI-SAE

Baja paduan tinggi (high alloy steels) memiliki sifat sangat keras, kuat tetapi keuletan yang rendah. Biasanya baja jenis ini digunakan pada kondisi yang telah dikeraskan (hardened) dan di-temper, sehingga memiliki kekerasan yang masih tinggi dan ketahanan aus yang baik, sehingga dapat berfungsi sebagai pisau potong yang sangat tajam. Peralatan potong (tools) dan cetakan (die) terbuat dari baja karbon paduan tinggi, yang biasanya terdiri dari unsur: Cr (chromium), V (vanadium), W (tungsten), dan Mo (molybdenum).

Penambahan unsur paduan akan menggeser temperatur eutektoid (yang semula adalah 723 °C) ke temperatur yang lebih tinggi atau lebih rendah tergantung dari jenis unsurnya. Demikian juga halnya dengan posisi titik eutektoid (awalnya 0,77% C) juga mengalami perubahan dengan penambahan unsur paduan lainnya. Gambar 4.5 (a) dan (b) menunjukkan pengaruh penambahan unsur paduan terhadap temperatur dan titik eutektoid pada diagram Fe-Fe<sub>3</sub>C.



Pengaruh unsur paduan terhadap temperatur dan posisi eutektoid pada diagram fasa Fe-Fe<sub>3</sub>C.

#### 4.4.3 Baja Alat-Potong.

Baja alat potong (*tool steel*) merupakan paduan Fe (besi) dan C (karbon) dan unsur lainnya, seperti krom, nikel, tungsten, molybdenum dalam jumlah yang besar, sehingga material yang dihasilkan sangat keras dan dapat dipakai sebagai alat potong. Untuk menghasilkan alat potong dengan kualitas baik, maka perlu dikontrol unsur paduannya, dan biasanya proses pemaduan dilakukan dengan menggunakan tungku elektrik (*electrical furnace*). Oleh karena itu harga alat potong tersebut sangat mahal karena proses pembuatannya yang juga mahal.

Proses pembuatan alat potong dilakukan dengan cara perlakuan panas, yaitu dipanaskan sampai temperatur austenit kemudian di celup cepat (*quenching*) dan diikuti dengan proses temper (*tempering*), untuk mendapatkan kekerasan yang dikehendaki dan menghilangkan tegangan sisa yang terjadi saat proses celup cepat tersebut. Pada tabel 4.5 menunjukkan proses perlakuan panas yang digunakan berikut cairan untuk celup cepat menurut standar AISI/SAE untuk memperoleh alat potong yang dikehendaki.

Tabel 4.5 Beberapa Proses Perlakuan Panas Baja Potong

Tool steels		
	Prefix	Specific Types
Cold work	W (water hardening)	W1, W2, W5
	O (oil hardening)	O1, O2, O6, O7
	A (medium alloy air hardening)	A2, A4, A6, A7, A8, A9, A10, A11
	D (high C, high Cr)	D2, D3, D4, D5, D7
Shock resisting	S	S1, S2, S4, S5, S6, S7
Hot work	H	H10–H19 chromium types
		H20–H39 tungsten types
		H40–H59 molybdenum types
High speed	M	Molybdenum types: M1, M2, M3-1, M3-2, M4, M6, M7, M10, M33, M34, M36, M41, M42, M46, M50
		Tungsten types: T1, T4, T5, T6, T8, T15
Mold	P	Mold steels: P6, P20, P21
Special purpose	L	Special-purpose steels: L2, L6

#### 4.5 Baja Tahan Karat.

Baja tahan karat (*stainless steel*) biasanya disingkat s/s merupakan baja paduan yang ketahanannya terhadap karat/karosi sangat tinggi. Baja tahan karat memiliki unsur paduan utama adalah: chromium (Cr) dengan kandungan minimum 11% sampai dengan 14% dari berat totalnya. Keberadaan unsur Cr ini yang akan membentuk lapisan pelindung krom-oksida.

Mekanisme perlindungan baja tahan karat dari korosi diilustrasikan pada gambar 4.6. Dipermukaan baja tahan karat akan terbentuk lapisan tipis krom-oksida hasil dari reaksi krom dan oksigen yang ada di udara. Bila lapisan tersebut terkelupas maka krom yang ada di dalam baja secara otomatis akan bereaksi kembali dengan oksigen sehingga akan selalu terbentuk lapisan pelindung. Tidak demikian halnya dengan baja yang hanya dilapisi krom. Baja hanya akan terlindungi selama lapisan kromnya menempel. Sedangkan bila lapisan tersebut terkelupas maka tidak ada lagi lapisan pelindungnya.



Gambar 4.6 Ilustrasi Mekanisme perlindungan korosi dari baja tahan karat.

Baja tahan karat dibagi kedalam beberapa kelompok, yaitu: baja tahan karat Feritik (*Ferritic s/s*); baja tahan karat Martensitik (*Martensitic s/s*); baja tahan karat Austenitik (*Austenitic s/s*); baja tahan karat Precipitation – hardening ( P/H ). Tabel 4.6 memuat beberapa jenis baja tahan karat berikut komposisi, kekuatan tarik dan pemakaiannya.

Austenitic s/s dan ferritic dikeraskan dan ditingkatkan kekuatannya dengan cara pengerjaan dingin (*cold work*) karena keduanya tidak dapat di proses

perlakuan panas (*heat treatment*). Dari keempat jenis s/s diatas yang paling banyak diproduksi adalah tipe baja tahan karat austenitik. Tipe baja tahan karat martensitik dan feritik lengket dengan magnet sedangkan tipe baja tahan karat austenitiks tidak lengket dengan magnet.

#### **4.5.1 Baja Tahan Karat Feritik.**

Baja tahan karat feritik adalah paduan baja dengan unsur Cr antara 12% sampai dengan 30% dan disebut juga baja tahan karat feritik karena fasa yang terbentuk adalah ferit (BCC). Baja tahan karat feritik relatif murah dalam pembuatannya karena tidak mengandung unsur Ni. Akan tetapi dengan perkembarkembangan teknologi baja jenis ini juga mengandung unsur C dan Ni yang sangat rendah sehingga memperbaiki ketahanan korosinya.

#### **4.5.2 Baja Tahan Karat Auatenitik.**

Baja Tahan Karat Auatenitik (*Austenitic stainless steel*) adalah baja tahan karat yang dapat dikeraskan dan ditingkatkan kekuatan tariknya dengan cara pengerjaan dingin (*cold work*) karena baja jenis ini tidak dapat diproses dengan perlakuan panas (*heat treatment*). Baja tahan karat tipe ini paling banyak dipakai dan tersedia degan harga yang relative murah dasaran dibandingkan baja tahan karat jenis lainnya. Baja tahan karat austenitik ini memiliki sifat tidak bereaksi dengan magnet. Baja tahan karat tipe austenitik memiliki fasa austenit dengan kandungan krom (Cr) 16 % sampai dengan 25% dan kandungan nikel (Ni) 7 % sampai dengan 20%. Fasa austenit yang terbentuk stabil pada temperatur kamar (bandingkan

dengan baja yang memiliki fasa austenite pada temperature mulai 910 °C). Baja tahan karat austenite ini memiliki sifat ketahanan korosi yang lebih besar dibandingkan dengan baja tahan karat martensitik maupun baja tahan karat feritik.

Untuk tujuan pengelasan agar tidak terbentuk endapan/presipitat carbida dibatas butir maka kandungan carbon dibuat sangat rendah, dan untuk membedakannya ditambahkan huruf “L” dibelakangnya contohnya 304 L, 316 L dan lainnya. Teknik lainnya adalah dengan menambahkan unsur – unsur paduan lain seperti niobium ( AISI 347 ), Ti (AISI 321). Tujuan penambahan unsur tersebut agar tidak terbentuk presipitat karbida di batas butir. Peristiwa terbentuknya karbida dibatas butir disebut dengan sensitasi (sensitizing). Bila didalam baja tahan karat terbentuk karbida akibat proses senditasi maka fungsi dari ketahanan karatnya akan berkurang.

#### **4.5.3 Baja Tahan Karat Martensitik**

Secara umum pembuatan baja tahan karat martensitik adalah ssebagai berikut: baja ini dipanaskan sampai mencapai temperature austenit di celup cepat (quenched) sehingga terbentuk fasa martensit. Kemudian diikuti dengan proses temper (tempered) dengan tujuan menghilangkan tegangan sisa yang terbentuk selama proses celup cepat berlangsung. Tegangan sisa yang terbentuk memiliki sifat keras dan sangat getas.

Tabel 4.5 Komposisi dan Sifat Mekanik dari Baja Tahan Karat.

AISI Number	UNS Number	Composition (wt%) <sup>a</sup>	Condition <sup>b</sup>	Mechanical Properties			Typical Applications
				Tensile Strength [MPa (ksi)]	Yield Strength [MPa (ksi)]	Ductility [%EL in 50 mm (2 in.)]	
<b>Ferritic</b>							
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
<b>Austenitic</b>							
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
<b>Martensitic</b>							
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
<b>Precipitation Hardenable</b>							
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

<sup>a</sup> The balance of the composition is iron.

<sup>b</sup> 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.

#### 4.6 Besi Cor/Tuang (Cast Iron).

Besi cor/tuang umumnya terdiri dari 2% s/d 4% carbon dan 1% – 3% silikon, dan unsur-unsur lainnya dalam jumlah yang sedikit. Secara umum besi cor/tuang menghasilkan produk coran yang baik, karena mudah dicairkan

(temperatur cair antara 1150 °C – 1300 °C) sehingga biaya produksi besi cor lebih murah dibandingkan baja. Besi cor terdiri dari fasa perlit atau ferit (tergantung dari laju pendinginannya) dan karbon bebas dalam bentuk grafit. Kecenderungan akan terbentuknya grafit diatur oleh komposisi dan laju pendinginan termasuk didalamnya proses perlakuan panas. Disamping itu adanya unsur silikon dengan kandungan yang lebih besar dari 1% beratnya turut mempengaruhi bentuk karbida yang timbul. Tabel 4.6 menunjukkan unsur-unsur pembentuk besi cor.

tabel 4.6 Unsur Pembentuk Besi Cor

Element	Gray Iron, %	White Iron, %	Malleable Iron (cast white), %	Ductile Iron, %
Carbon	2.5–4.0	1.8–3.6	2.00–2.60	3.0–4.0
Silicon	1.0–3.0	0.5–1.9	1.10–1.60	1.8–2.8
Manganese	0.25–1.0	0.25–0.80	0.20–1.00	0.10–1.00
Sulfur	0.02–0.25	0.06–0.20	0.04–0.18	0.03 max
Phosphorus	0.05–1.0	0.06–0.18	0.18 max	0.10 max

Besi cor di golongankan ke dalam 4 jenis, berdasarkan distribusi karbon didalam stuktur mikro yaitu besi cor kelabu (*gray cast iron*), besi cor nodular/ductile (*nodular cast iron*) dan besi cor putih (*white cast iron*) dan besi cor maliabel (*malleable cast iron*).

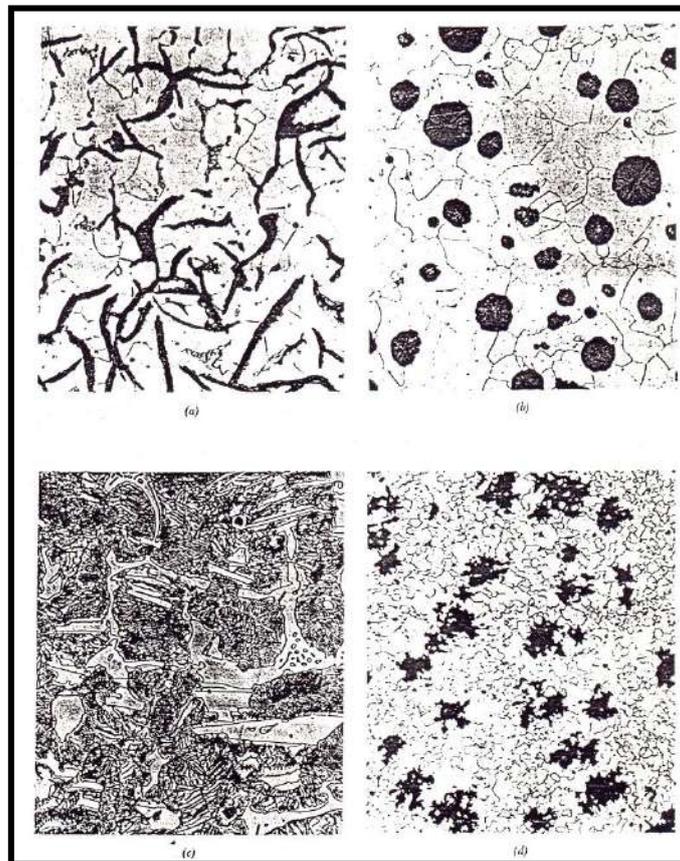
#### 4.6.1 Besi Cor Kelabu (*Gray Cast Iron*).

Kandungan carbon dan silikon pada besi cor kelabu antara 2,5% sampai dengan 4,0% dan 1.0% sampai dengan 3%. Bentuk grafitnya adalah *flakes* (gambar 5.7 a). Karena grafit berbentuk flakes permukaan patahnya berwarna kelabu. Sifat mekanis dari besi cor kelabu: getas (*brittle*) dan keras, kekuatan tarik tinggi dan

keuletannya lebih besar bila pembebanannya adalah tekan (compressive load).

Keuntungan dari besi cor kelabu adalah sbb:

- Dapat menyerap energi getaran (*damping vibrational energy*).
- Ketahanan gesek (*Wear resistance*) tinggi.
- Pada kondisi cair memiliki fluiditas yang tinggi sehingga dapat menghasilkan bentuk-bentuk benda kerja yang rumit dan kemungkinan terjadinya pengkerutan (*shrinkage*) kecil, pada saat dituang/dicor.
- Biaya/ongkos pengecoran yang relatif murah.



Gambar 4.7 Struktur mikro besi cor. (a) besi cor kelabu; (b) besi cor nodular; (c) besi cor putih; (d) besi cor maliabel

#### **4.6.2 Besi Cor Nodular/Ductile (*Ductile/nodular iron*).**

Dengan menambahkan “sedikit” Magnesium dan atau Cerium pada besi cor kelabu sebelum dicor akan mengubah bentuk grafit dari *flakes* menjadi nodular –bulat- (gambar 4.7 b). Hasilnya dinamakan nodular atau ductile iron yang memiliki sifat-sifat mekanis yang tinggi. Matriks yang terbentuk perlit atau ferit tergantung laju pendinginan seperti terlihat pada gambar 4.7b). Proses penambahan unsur Cerium harus hati-hati mengingat unsur ini sangat mudah terbakar.

Karena bentuk grafit tersebut maka, sifat mekanik besi cor nodular hampir sama (mendekati) sifat mekanik baja. Sebagai contoh besi cor nodular feritik mempunyai rentang kekuatan tarik antara 380 MPa sampai dengan 480 MPa (55.000 psi sd 70.000 psi), dan keuletannya dari 10% sampai 20%. Adapun penggunaannya pada katup (*valves*), rumah pompa (*pump bodies*), *crankshafts*, rodagigi dan komponen – komponen otomotif lainnya.

#### **4.6.3 Besi Cor Putih (*White Cast Iron*).**

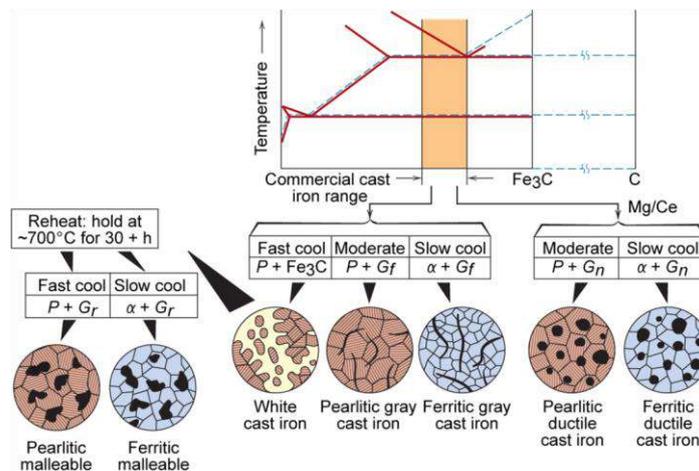
Besi cor putih terbentuk karena adanya laju pendinginan yang sangat cepat (gambar 4.7 c) dan kandungan silicon yang rendah (kurang dari 1% beratnya). Disebut besi cor putih karena menghasilkan warna putih atau terang pada permukaan patahannya. Besi cor putih biasanya sangat baik digunakan untuk struktur yang mengalami gesekan dan abrasi. Sebagai konsekuensi dari banyaknya fasa sementit yang terbentuk, maka besi cor putih sangat keras dan getas.

Tabel 4.7 Komposisi kimia dari besi cor/tuang.

Element	Gray Iron, %	White Iron, %	Malleable Iron (cast white), %	Ductile Iron, %
Carbon	2.5–4.0	1.8–3.6	2.00–2.60	3.0–4.0
Silicon	1.0–3.0	0.5–1.9	1.10–1.60	1.8–2.8
Manganese	0.25–1.0	0.25–0.80	0.20–1.00	0.10–1.00
Sulfur	0.02–0.25	0.06–0.20	0.04–0.18	0.03 max
Phosphorus	0.05–1.0	0.06–0.18	0.18 max	0.10 max

#### 4.6.4 Besi Cor Maliabel (*Malleable Cast Iron*).

Karena sifat yang tidak diinginkan dari besi cor putih tersebut, maka biasanya besi cor putih dipanaskan kembali (lihat gambar 5.8) pada temperatur antara 800 °C s/d 900 °C, akan membentuk besi cor yang lain yang di sebut dengan besi cor maleabel (*malleablecast iron*). Matrik yang terbentuk berupa ferit atau perlit yang sangat tergantung dari laju pendinginannya. Struktur mikronya mirip dengan besi cor nodular, sehingga sifat-sifatnya juga hampir sama terutama dalam hal kekuatan dan keuletannya. Besi cor putih biasanya dipakai sebagai batang penghubung (connecting rods), rodagigi transmisi, dan rodagigi diferensial untuk transmisi di industri otomotif; flange, fitting pipa, dan komponen untuk katup (valves) untuk industri maritim dan industri alat berat lainnya.



Gambar 4.8 Ilustrasi proses pembentukan besi cor.

## **4.7 Logam Non-Fero dan Paduannya.**

Baja dan paduan fero lainnya memang sangat banyak digunakan, karena memiliki sifat-sifat mekanik dengan rentang yang sangat lebar, relatif mudah untuk di buat/fabrikasi, dan dengan ongkos pembuatan yang relatif murah. Akan tetapi beberapa keterbatasannya antara lain: memiliki berat jenis yang relatif tinggi ( $7,8 \text{ g/cm}^3$ ); memiliki konduktivitas elektrik yang relatif rendah; dan lebih mudah terkorosi pada lingkungan yang biasa.

Paduan logam selain fero jumlahnya sangat banyak. Dalam hal ini yang akan dibahas adalah: paduan aluminium (Al), paduan tembaga (Cu), paduan magnesium (Mg), paduan titanium (Ti) dan paduan nikel (Ni), logam yang memiliki titik cair yang tinggi –material refraktori- (refractory materials), logam mulia (noble metals), dan paduan lainnya.

### **4.7.1 Aluminium (Al) dan Paduan Aluminium.**

Aluminium memiliki massa jenis yang ringan,  $2700 \text{ kg/m}^3$  dibandingkan dengan baja yang  $7800 \text{ kg/m}^3$ , serta memiliki ketahanan korosi yang tinggi pada lingkungan biasa dibandingkan dengan baja. Aluminium murni memiliki sifat kekuatan (*strength*) yang rendah, tetapi adanya paduan dengan unsur-unsur lainnya akan meningkatkan kekuatannya. Aluminium juga memiliki sifat tidak beracun (*non toxic*) sehingga dapat dipakai sebagai pembungkus dan atau tempat makanan. Disamping itu juga memiliki sifat elektrik yang baik menjadikan Al banyak dipakai pada industri elektronik.

Paduan Aluminium biasanya dibuat dalam bentuk : pelat (*sheet/plate*), *extrusion*, bangan (*rod*) dan kawat (*wire*) dengan berbagai ukuran diameter, serta diklasifikasikan berdasarkan unsur paduan utama yang membentuknya. Empat angka bilangan digunakan untuk mengidentifikasi aluminium paduan kasar (*Wrought Al Alloys*), seperti pada tabel 5.8. Angka pertama menunjukkan unsur paduan utama, sedangkan dua angka terakhir menunjukkan paduan Al.

Tabel 4.8 Kelompok paduan Al kasar (wrought alloys)

Al, kandungan minimum 99.00%, atau lebih	1XXX
Paduan dengan unsur utama : Cu	2XXX
Mn	3XXX
Si	4XXX
Mg	5XXX
Mg & Si	6XXX
Zn	7XXX
Elemen lainnya	8XXX
<i>Unused series</i>	9XXX

Tanda temper (*temper-designation*) untuk paduan aluminium kasar ditulis dibelakang empat angka terakhir dengan menggunakan tanda penghubung (-), yang berupa huruf capital (misalnya: F = difabrikasi; O = dianil; H = pengerasan regangan; T = temper) dan diikuti satu sampai dengan tiga angka. Paduan Al kasar biasanya dibagi kedalam dua kelompok yaitu:

- Paduan Al yang dapat di proses perlakuan panas (*heat-treatable*).

- Paduan Al yang tidak dapat di proses perlakuan panas (*non-heat-treatable*).

Paduan Al yang tidak dapat di proses dengan perlakuan panas tidak dapat dilakukan penguatan presipitat (*precipitation-strengthened*), akan tetapi dapat ditingkatkan kekuatannya dengan cara pengerjaan dingin (*cold work*). Paduan Al yang tidak dapat di proses perlakuan panas adalah dari grup: 1XXX, 3XXX, 5XXX. Paduan 1XXX : paduan yang memiliki kandungan Al min 99,00%, dan besi serta silikon sebagai unsur utama pembentuk ketidakmurnian (*impurities*). Penambahan unsur Cu 0,12% akan menaikkan kekuatannya. Paduan 3XXX : Mn adalah unsur paduan utama dan peningkatan kekuatan dilakukan dengan larutan padat (*solid-solution strengthen*). 3003 adalah paduan utama yang penting didalam kelompok ini dengan kekuatan tarik mencapai 16ksi (110MPa). 5XXX : Mg adalah unsur paduan utama pada kelompok ini. Salah satu paduan yang penting pada kelompok ini adalah 5052 yang terdiri dari 2,5% Mg dan 0,2% Cr. Pada kondisi anil 5052 memiliki kekuatan tarik 28 ksi (193 MPa). Paduan Al yang dapat di proses perlakuan panas adalah dari grup 2XXX, 6XXX dan 7XXX .

Paduan 2XXX : unsur paduan utamanya adalah Cu, tetapi kadang-kadang juga ditambahkan Mg dalam jumlah sedikit. Salah satu paduan yang penting adalah 2024, yang terdiri dari 4,5% Cu, 1,5% Mg dan 0,6% Mn. Paduan ini ditingkatkan kekuatannya dengan cara larutan padat (*solid-solution*) dan penguatan presipitasi (*precipitation strengthening*). Al 2024T6 memiliki kekuatan tarik 54 ksi (442 MPa) dan banyak dipakai pada struktur pesawat terbang. Paduan 6XXX : unsur paduan utamanya adalah Mg dan Si. Paduan 6061 adalah salah satu paduan yang penting pada kelompok ini dengan komposisi unsurnya 1,0% Mg, 0,6% Si, 0,3% Cu dan

0,2% Cr. Paduan 7XXX : unsur paduan utamanya adalah Zn, Mg dan Cu. 7075 adalah salah satu paduan utama yang penting dengan komposisi 5,6% Zn, 2,5% Mg, 1,6% Cu dan 0,25% Cr dengan kekuatan tarik mencapai 73 ksi (504 MPa) dan biasanya digunakan pada struktur pesawat terbang.

#### **4.7.2 Titanium (Ti) dan Paduan.**

Titanium Adalah logam yang sangat mahal, karena sangat sulit untuk menghasilkan Ti murni (memisahkannya dari unsur paduan yang lain). Paduan titanium sangat kuat, pada temperatur ruangan kekuatan tariknya mencapai 1400 MPa (200.000 psi) dan ringan sehingga sangat sesuai untuk komponen struktur pesawat terbang, komponen kompresor motor jet (tabel 5.9 beberapa paduan Ti dan penggunaannya) serta memiliki keuletan yang tinggi sehingga mudah untuk di bentuk (forging) dan di machining. Sedangkan kekurangannya sangat reaktif dengan material lainnya pada temperatur tinggi. Sifat-sifat Ti murni antara lain:

- memiliki berat jenis yang ringan yaitu  $4500 \text{ kg/m}^3$ ; titik cair yang tinggi yaitu  $1668 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $3035 \text{ }^\circ\text{F}$ ); modulus elastisitas  $107 \times 10^3 \text{ MPa}$  ( $15,5 \times 10^6 \text{ psi}$ );
- struktur kristal HCP (alpha) pada temperatur ruang dan berubah menjadi BCC (beta) pada temperatur  $883 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- tahan terhadap korosi, sehingga sesuai untuk pipa penyalur zat-zat kimia yang korosif pada industri kimia , LNG dan industri pupuk.

### 4.7.3 Nikel (Ni) dan paduannya.

Nikel pertama kali ditemukan pada tahun 1751. Nikel murni memiliki kekuatan dan konduktivitas elektrik yang baik sehingga banyak digunakan untuk komponen-komponen elektronik. Keuntungan lainnya adalah memiliki ketahanan terhadap korosi yang tinggi sehingga sesuai untuk peralatan pada industri makanan. Selain itu, Ni memiliki: sel satuan FCC; berat jenis  $8,9 \text{ g/cm}^3$ ; dan dapat dipakai pada suhu yang sangat rendah.

Paduan Nikel Ni yang penting adalah:

- Paduan Monel 400 adalah paduan Ni dengan Cu sekitar 30%, yang memiliki sifat : kekuatan yang relatif tinggi, mampu las baik, dan ketahanan korosi yang tinggi pada berbagai lingkungan. Penambahan sekitar 3% Al dan 0,6% Ti akan menaikkan kekuatan dari Monel.
- Nickel-base superalloy, paduan yang dikembangkan secara khusus untuk komponen-komponen turbin gas, yang mengharuskan memiliki ketahanan pada temperatur yang tinggi, oksidasi yang tinggi serta ketahanan terhadap creep. Paduan Nickel-base superalloy terdiri dari sekitar 50 s/d 60% Ni, 15 s/d 20% Cr, dan 15 s/d 20% Co. penambahan sedikit Al (0,5 s/d 4%) dan Ti (1 s/d 4%) digunakan untuk penguatan presipitat (presipitation Strengthening).
- Paduan Inconel, adalah paduan antara Ni dengan Cr yang memiliki kekuatan tarik mencapai 1400 MPa.

- Paduan hastelloy, adalah paduan antara Ni, Mo dan Cr, yang memiliki sifat ketahanan korosi yang baik serta kekuatan yang tinggi pada pada temperatur tinggi (elevated temperature).
- Nichrome, adalah paduan antara Ni, Cr, dan besi, yang memiliki sifat penghantar listrik yang baik, ketahanan yang tinggi pada oksidasi dan biasanya digunakan sebagai elemen pemanas.

Tabel 4.9 Unsur Paduan Ti dan Penggunaannya.

PADUAN	PENGGUNAAN
Ti ( <i>unalloyed</i> )	Pemakaian dimana, <i>high ductility</i> dan kekuatan menengah ( <i>maderate strength</i> ) disyaratkan.
Ti-Al-V alloy	Bila kekuatan pada temperatur tinggi (600 °C) disyaratkan, seperti untuk sudu kompresor turbin gas, pesawat dan komponen struktur pesawat.
Ti-Al-Sn alloy	Bila kekuatan pada temperatur tinggi (600 °C) disyaratkan, seperti untuk tangki bahan bakar peluru kendali, komponen turbin gas, autoclaves.
Ti-Mn alloy	Bila kekuatan pada temperatur tinggi (600 °C) dan mampu bentuk disyaratkan, seperti untuk kulit pesawat terbang.
Ti-Al-Mo alloy	Sudu kompresor turbin gas, discs, dan spacer.
Ti-Al-Mn alloy	<i>Airframe forgings</i> , dan komponen kompresor pesawat.

#### 4.7.4 Tembaga (Cu) dan Paduannya.

Tembaga murni, bersifat sangat lunak sehingga sulit untuk di machining, dan memiliki sifat penghantar panas yang baik. Pemaduan pada tembaga akan memperbaiki sifat kimia dan sifat mekaniknya antara lain: kekuatan dan kekerasan meningkat, ketahanan aus meningkat, serta meningkatkan ketahanannya terhadap korosi. Adapun paduan Tembaga yang penting adalah dan sering digunakan pada kehidupan sehari-hari dalam bentuk peralatan yang dipakai di dalam rumah tangga antara lain: Kuningan (*brass*): yaitu campuran antara unsur Cu dan Zn, serta paduan perunggu (*bronze*) yaitu paduan antara unsur Cu dan Sn yang telah lama digunakan sebagai peralatan rumah tangga raja-raja kuno.

Perunggu mulai dipergunakan sejak 2000 tahun sebelum Masehi. Perunggu adalah paduan dari: Cu dan Sn. Dalam industry manufaktur perunggu banyak dipakai sebagai bantalan luncur (ditambah sedikit Pb), *impeller* pompa centrifugal, rumah pompa dan rumah katup, piala dan lainnya. Di Indonesia perunggu sudah lama digunakan sebagai lonceng dan gamelan.

Kuningan adalah paduan tembaga yang sudah lama digunakan karena memiliki sifat antara lain: mampu bentuk yang baik, daya hantar panas yang baik. Paduan kuningan dengan menambahkan Zn akan menaikkan kekuatan dan kekerasan serta menaikkan keuletan dengan penambahan 30 % Zn. Kuningan banyak dipakai sebagai: cartridge brass untuk longsong peluru, propeller kapal laut, radiator kendaraan, perhiasan dan peralatan rumah tangga, peralatan musik, pembungkus barang elektronik, uang koin, dan lain-lain.

#### **4.7.5 Magnesium (Mg) dan Paduannya.**

Mg adalah logam teknik yang paling ringan, dengan massa jenis  $1,7 \text{ g/cm}^3$  dan memiliki sifat yang baik dalam meredam getaran. Magnesium dan paduannya digunakan bila berat menjadi faktor yang sangat menentukan, seperti pada komponen pesawat terbang. Magnesium mempunyai struktur kristal HCP, relatif lunak dan modulus elastisitasnya yang rendah. Penggunaan unsur magnesium dan paduannya telah lama digunakan sebagai komponen pesawat terbang dan peluru kendali (*missile*) peralatan angkat, sepeda, peralatan orah raga, dan peralatan-peralatan yang menjadikan berat sebagai factor utama dalam penggunaannya.

#### **4.7.6 Paduan Kekuatan Tinggi (*Super Alloys*).**

Adalah paduan yang penting bila lingkungan kerja berada pada temperatur tinggi. Superalloy disebut juga material tahan panas atau paduan yang bekerja pada temperatur tinggi. Kebanyakan paduan ini digunakan pada mesin pesawat jet, turbin gas, mesin roket, die untuk pekerjaan panas (*hot working die*) lainnya, pabrik nuklir, dan industri kimia dan petrokimia. Superalloy mempunyai ketahanan yang baik terhadap korosi, lelah akibat panas (*thermal fatigue*) dan *mechanical fatigue*, *mechanical shock* dan *thermal shock*, *creep* dan erosi yang kesemuanya terjadi pada temperatur tinggi. Secara umum superalloy diidentifikasi dengan merek dagangnya atau sistem penomoran yang khusus. Kebanyakan superalloy bekerja pada temperatur sekitar  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , dan bahkan dapat mencapai  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  bila beban yang bekerja tidak terlalu besar.

Paduan superalloy terdiri dari: Iron-base superalloys umumnya mengandung 32%-67% Fe, 15%-22% Cr, dan 9%-38% Ni. Biasanya paduan ini termasuk dalam seri Incoloy; Cobalt-base superalloys umumnya terdiri dari: 35%-65% Co, 19%-30% Cr, dan Ni mencapai 35%; Nickel-base superalloys umumnya terdiri dari Ni mulai dari 38% s/d 76%, 27% Cr dan Co 20%. Yang termasuk dalam paduan ini adalah: Hastelloy, Inconel, Nimonic, René, Udimet, Astroloy, dan Waspaloy

#### **4.7.7 Logam Mulia (*Noble materials*).**

Logam mulia adalah logam yang paling mahal, mempunyai karakteristik yang sangat baik seperti lunak, keuletan, dan sangat tahan terhadap korosi. Yang termasuk dalam logam ini adalah: Au (gold), Ag (silver), Pt (platinum), palladium, rhodium, rutherfordium, iridium dan osmium. Emas, perak dan platinum merupakan material yang paling sering di gunakan untuk perhiasan. Paduan emas dan paduan perak sering digunakan untuk pembuatan gigi palsu. Platina digunakan untuk peralatan laboratorium dan sebagai alat ukur pada temperatur tinggi.

#### **4.7.8 Material Refraktori (*Refractory Materials*).**

Ditemukan sekitar 200 tahun yang lalu dan mulai dipakai sebagai bahan teknik (*engineering materials*) sekitar tahun 1940-an. Disebut sebagai refraktori karena memiliki titik lebur yang tinggi, antara 2468 °C untuk niobium sampai 3410 °C untuk tungsten. Rentang temperatur kerjanya adalah mulai 1100 °C - 2200 °C. Pada temperatur tersebut tidak akan terjadi penurunan sifat-sifat disiknya maupun

kekuatannya. Material refraktori ada 4 jenis yaitu: Molybdenum (Mo); Tungsten (W); Tantalum (Ta); dan Niobium (Nb). Adapun pemakaian dari material refraktori ini adalah: mesin roket, turbin gas, dan pemakaian pada pesawat angkasa luar; pada produk elektronika, pembangkit nuklir, industri kimia dan sebagai alat potong (tools) dan cetakan (dies). Tantalum dan molibdenum dicampurkan pada baja tahan karat akan memberikan efek ketahanan korosi yang lebih tinggi lagi.

#### **4.7.9 Paduan yang Memiliki Titik Cair Rendah.**

Disebut demikian karena memang memiliki titik cair yang relatif rendah. Unsur yang penting pada paduan ini adalah: Pb (lead), Zn (zinc), dan Sn (tin).

#### **4.7.10 Material Nano.**

Material yang dibuat khusus dengan sifat yang juga juga sangat khusus dan spesifik. Kata nano berasal dari struktur yang memiliki ukuran nanometer ( $10^{-9}$  m). Sebagai contoh material nano memiliki kekuatan 1000 kali lebih kuat dibandingkan dengan baja dan 10 kali lebih ringan dibandingkan kertas. Sifat-sifat yang dihasilkannya dapat disesuaikan seperti: ketahanan terhadap deformasi dan kerusakan, keuletan, kekakuan (stiffness), kekuatan, ketahanan gesek dan aus, serta ketahanan korosi yang sangat tinggi. Sifat lainnya yang juga baik adalah kestabilan terhadap panas dan bahan kimia, serta sifat elektriknya.

## **BAB 5**

### **LOGAM NON FERRO**

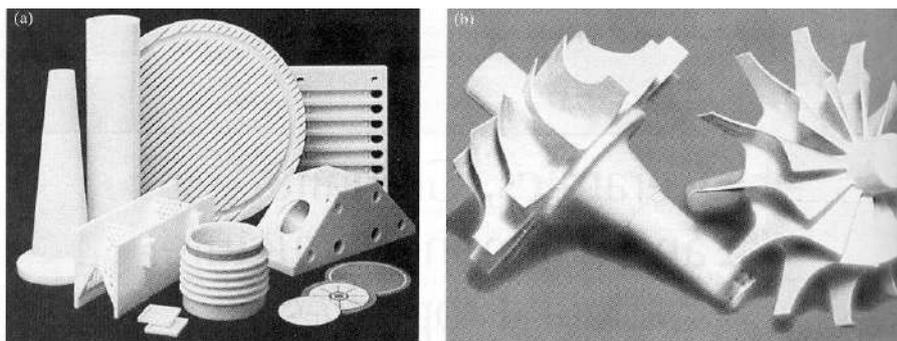
Objektif :

- a. Mengetahui jenis-jenis material non fero.
- b. Mengetahui sifat dan penggunaannya dalam industri manufaktur.

#### **5.1 Keramik.**

Keramik adalah paduan dari unsur logam dan bukan logam. Keramik telah lama digunakan sebagai perhiasan dan peralatan minum para bangsawan di zamannya. Sampai saat ini keramik masih dipakai sebagai peralatan rumah tangga seperti cangkir dan ubin (*tile*). Di industri secara spesifik industri otomotif keramik telah lama dipakai untuk komponen pendukung seperti busi dan komponen lainnya untuk pemakaian pada temperatur tinggi. Keramik dapat dibagi kedalam dua kategori yaitu keramik tradisional, contoh: cangkir, ubin, tembok (*brick*) batu gerinda dan keramik untuk industri. Di industri keramik digunakan pada turbin gas, komponen otomotif dan komponen pada pesawat ruang angkasa. Material dasar dari keramik (yang paling tua) adalah lempung (*clay*), dan yang paling terkenal adalah kaolin (sebuah bukit di China Kao-lin). Material dasar keramik lainnya adalah flint ( $\text{SiO}_2$ ) dan feldspar (adalah kumpulan dari aluminium silikat ditambah dengan potasium, kalsium atau sodium). Di industri otomotif keramik digunakan sebagai komponen busi karena sifatnya yang tahan panas. Keramik digolongkan kedalam beberapa jenis, yaitu:

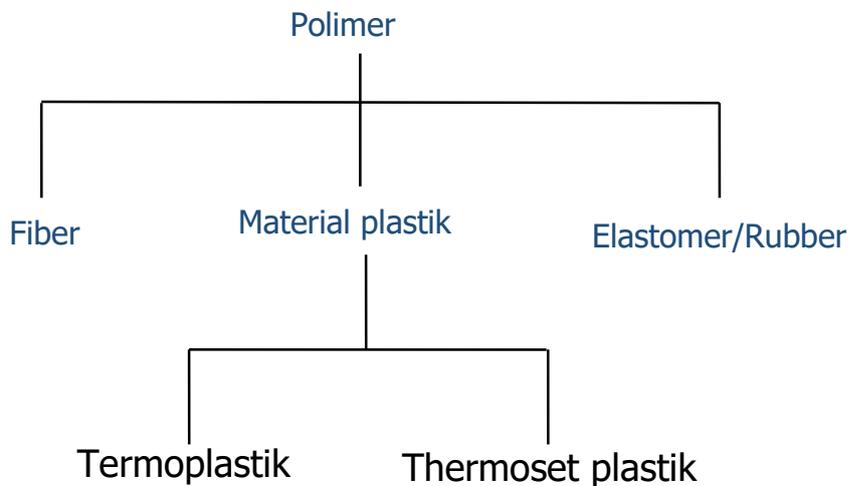
- a. Oksida keramik terdiri dari dua jenis, Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dan zirconia ( $\text{ZrO}_2$ ). Alumina memiliki kekerasan yang tinggi dan kekuatan yang menengah. Zirconia berwarna putih, memiliki ketangguhan (*toughness*) yang baik; ketahanan terhadap thermal shock yang baik, ketahanan terhadap gesekan dan korosi juga baik.
- b. Karbida, terdiri dari dari *tungsten carbide* (WC) dengan Co sebagai pengikat dan titanium carbide dengan pengikatnya adalah Mo dan Ni. Keduanya biasa digunakan sebagai cutting tools dan material die. Jenis lainnya adalah silicon carbide yang memiliki ketahanan terhadap gesekan dan korosi yang baik.
- c. *Nitrides* terdiri dari *cubic boron nitride* (CBN), titanium nitride (TiN) dan silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Silicon nitride sesuai untuk pemakaian pada temperatur tinggi seperti pada mesin otomotif dan komponen turbin gas, bearing, sand- blast nozzle dan komponen-komponen pada industri kertas.
- d. Siolan, terdiri dari **silicon nitride** dengan tambahan aluminum oksida, yttrium oksida dan titanium karbida. Penggunaannya kebanyakan pada alat potong (*cutting tool*).



Gambar 5.1 Contoh Produk dari keramik.

## 5.2 Polimer.

Kata plastik ditemukan pertama kali tahun 1909, yang biasanya digunakan sama dengan kata polimer. Plastik adalah salah satu jenis dari material polimer yang memiliki struktur molekul yang sangat besar. Saat ini polimer banyak digunakan untuk menggantikan komponen-komponen yang terbuat dari bahan logam, seperti pada otomotif, kendaraan sipil dan militer, peralatan olahraga, mainan anak-anak dan peralatan kantor. Polimer banyak digunakan karena memiliki keuntungan antara lain: ketahanan terhadap korosi dan reaksi kimia yang baik; konduktivitas panas dan listrik yang rendah, berat jenis yang rendah; rasio yang tinggi antara kekuatan dengan berat (*high strength-to-weight ratio*) khususnya bila dipakai sebagai penguat (*reinforced*); peredam suara; memiliki warna yang beragam dan transparan; mudah untuk di buat dengan bentuk-bentuk yang sangat kompleks; serta biaya produksi yang relatif murah.



Gambar 5.2 bagan Polimer

### 5.2.1 Fiber.

Fiber adalah material polimer yang sedikit sekali mengalami perubahan bentuk bila diberikan gaya, contohnya adalah wood (kayu), nilon dll. Sedangkan Elastometers atau rubbers (karet) yang bila diberikan gaya akan mengalami perubahan bentuk dan kembali lagi ke bentuknya yang semula bila gaya tersebut dihilangkan. Atau dengan perkataan lain dapat berdeformasi elastis dengan besar. Yang akan dibahas pada bagian ini ada dua, yaitu plastik dan elastomer.

Sifat dasar polimer ditentukan oleh: jenis atom dan pola dasar pembentuk rantai, berat molekul (BM), interaksi antar molekul, Plastik adalah material sintesis yang dapat diproses dengan cara forming atau molding ke dalam bentuk tertentu.

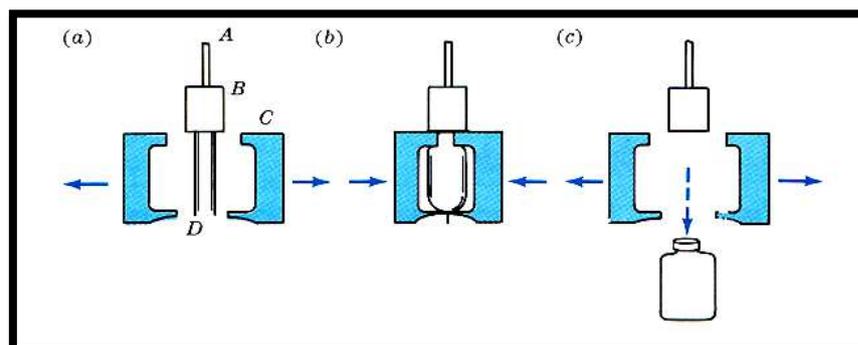
### 5.2.2 Material plastik.

Material plastik digolongkan kedalam dua jenis, yaitu termoplastik (thermoplastic) dan termoset plastic (thermosetting pastic). *Thermoplastics* adalah material yang memerlukan panas pada proses pembentukannya dan setelah dingin akan mengikuti bentuk yang dikehendaki. Proses ini dapat dilakukan berulang-ulang tanpa mengalami perubahan yang signifikan (perubahan hanya bersifat fisik dan bukan kimiawi). Proses pembuatan thermoplastic ada beberapa cara antara lain:

- a. *Injection molding machine*, adalah salah satu proses yang penting dalam pembuatan material thermoplastik. bahan dasar dari poses ini adalah plastik berbentuk bulat (*granules plastic*) yang dimasukkan kedalam hopper. Keuntungan dari proses ini adalah kualitas produk sangat baik pada laju

produksi yang tinggi, proses relatif memerlukan biaya tenaga kerja yang kecil, kualitas permukaan yang dihasilkan sangat baik, proses dapat dilakukan secara otomatis dan bentuk-bentuk produk yang rumit dapat dihasilkan. Sedangkan kekurangannya adalah harga mesin mahal sehingga volume produksi harus besar agar harga jual produk menjadi kompetitif, serta proses produksi harus dikontrol dengan ketat agar kualitas produk yang dihasilkan baik.

- b. *Extrusion*, biasanya digunakan untuk proses thermoplastics. Produk-produk yang dihasilkan dari proses ekstrusi adalah: pipa, batang pejal, film, lembaran, dan bentuk lainnya.
- c. Blow molding & Thermoforming, pada proses ini bahan plastik berupa silinder atau tabung yang telah dipanaskan (disebut parison), kemudian dihembuskan udara sampai semua plastic menutupi rongga cetakan kemudian dibiarkan sejenak dan benda kerja yang sudah terbentuk dikeluarkan dari cetakan, Prosesnya biasanya sangat cepat sehingga sesuai untuk produksi dalam jumlah yang besar.



gambar 5.3 Ilustrasi proses pembuatan botol plastic.

### 5.2.3 Elastomer (*Rubbers/Karet*).

Elastomer atau karet adalah material polimer dimana dimensinya dapat berubah bila dikenai tegangan dan akan kembali kebentuknya yang semula bila tegangan yang bekerja dihilangkan. Karet alam dibuat dari bahan latex yang dihasilkan dari pohon karet yang banyak tumbuh di daerah tropis terutama di Indonesia dan Malaysia. Vulkanisasi (*vulcanization*) adalah suatu proses kimia dimana molekul polimer digabung bersama-sama dengan cara cross-linking kedalam molekul yang lebih besar untuk menghambat gerakan molekular. Tahun 1839 Charles Goodyear yang pertama menemukan proses vulkanisasi tersebut untuk karet dengan menggunakan bahan dasar sulfur dan lead carbonate. Penggabungan karet alam dengan sulfur dan lead carbonate dan kemudian dipanaskan akan mengubah karet dari thermoplastic menjadi material elastomer.

Karet sintetis menguasai perdagangan karet sekitar 70% dimulai pada tahun 1980. Beberapa karet sintetis yang penting adalah: styrene-butadiene, nitrile rubbers, dan polychloroprenes.

Tabel 5.1 Beberapa Sifat dari *Elastomer*.

Elastomer	Tensile strength, ksi†	Elongation, %	Density, g/cm <sup>3</sup>	Recommended operating temp.	
				°F	°C
Natural rubber* ( <i>cis</i> -polyisoprene)	2.5–3.5	750–850	0.93	–60 to 180	–50 to 82
SBR or Buna S* (butadiene-styrene)	0.2–3.5	400–600	0.94	–60 to 180	–50 to 82
Nitrile or Buna N* (butadiene-acrylonitrile)	0.5–0.9	450–700	1.0	–60 to 250	–50 to 120
Neoprene* (polychloroprene)	3.0–4.0	800–900	1.25	–40 to 240	–40 to 115
Silicone (polysiloxane)	0.6–1.3	100–500	1.1–1.6	–178 to 600	–115 to 315

\* Pure gum vulcanizate properties. † 1000 psi = 6.89 MPa.

## BAB 6

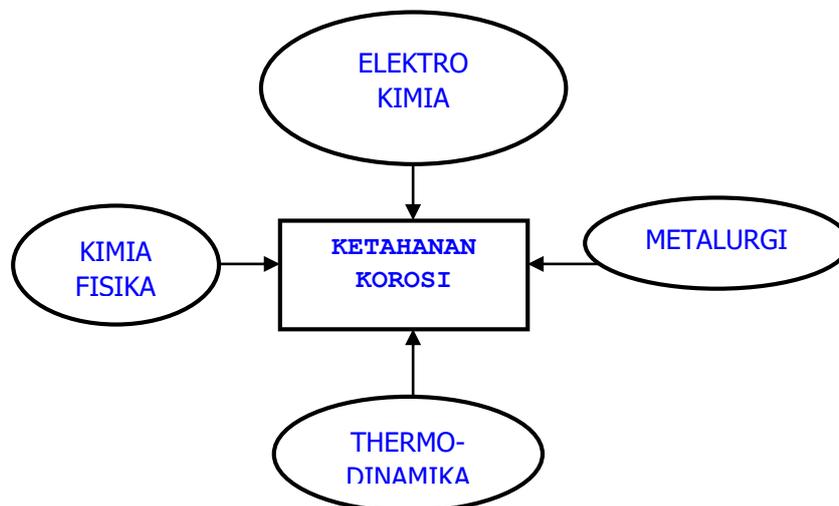
### KOROSI

Objektif :

- a. Mengetahui jenis-jenis korosi.
- b. Mengetahui penyebab korosi dan penanggulangannya diindustri.

#### 6.1 Pendahuluan.

Definisi dari korosi adalah: “Perusakan/penghancuran material karena adanya reaksi kimia dengan lingkungan sekitarnya”. Korosi diklasifikasikan dalam dua jenis yaitu korosi basah dan korosi kering. Faktor-faktor yang mempengaruhi ketahanan korosi suatu material ditunjukkan pada diagram gambar 6.1. laju korosi tidak dapat dicegah, yang dilakukan adalah memperlambat lajunya sehingga tidak sampai merusak.



Gambar 6.1 Skema Faktor yang mempengaruhi Terjadinya Korosi.

Korosi berdasarkan proses terjadinya serangan terhadap benda kerja atau peralatan kerja, dapat digolongkan kedalam 8 jenis, yaitu:

- Uniform atau general attack (korosi umum)
- Galvanic corrosion (korosi galvanik)
- Crevice corrosion (korosi celah)
- Pitting corrosion (korosi sumur)
- Intergranular corrosion (korosi batas butir)
- Selective leaching (korosi selektif)
- Erosion corrosion (korosi erosi)
- Stress corrosion (korosi tegangan).

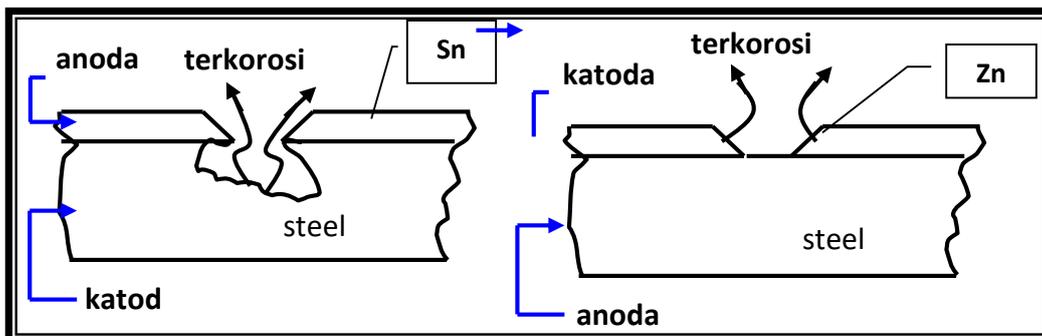
## **6.2 Korosi Umum (*Uniform/General Attack*).**

Korosi jenis ini adalah korosi yang sering terjadi terutama pada baja. Hal ini biasanya disebabkan oleh reaksi kimia atau elektro-kimia yang merata di seluruh permukaan. Untuk menanggulangnya beberapa langkah sederhana dan efektif dapat mengurangi laju korosi yang besar, antara lain:

- a. Penggunaan material yang sesuai, termasuk pelapisan (*coating*), cara ini sangat efektif dalam memperlambat laju korosi yang besar dan menunda proses kerusakan secara signifikan.
- b. Inhibitor (suatu zat yang ditambahkan dalam konsentrasi yang kecil ke lingkungan untuk menurunkan laju korosi). Proses aktual dilapangan perlu dikontrol oleh teknisi yang memang khusus untuk pekerjaan tersebut.
- c. proteksi katodik.

### 6.3 Korosi Galvanik (*Galvanic Corrosion*)

Korosi yang terjadi akibat adanya beda potensial di antara dua benda yang berhubungan atau terhubung secara elektrolit. Logam yang ketahanan korosi kurang disebut anodik, sedangkan logam yang ketahanan korosi tinggi disebut katodik. Tipe korosi ini juga dipakai untuk proses perlindungan di dalam industri pertambangan dan industri perminyakan yang prosesnya dilakukan di lepas pantai.



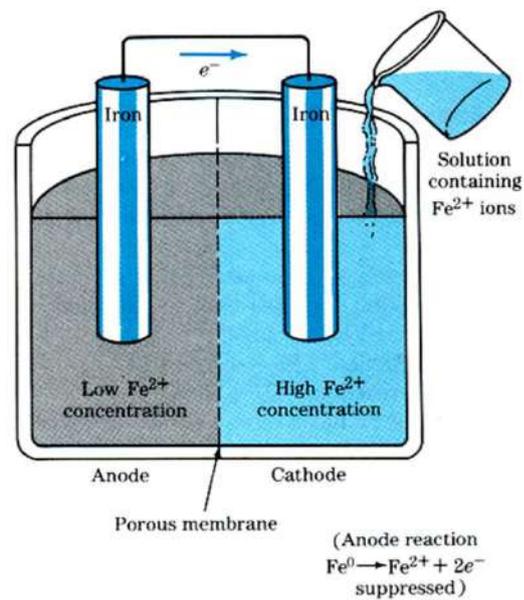
Gambar 6.2 Korosi Galvanis pada Dua Logam.

Proses ini disebut sebagai proteksi katodik. Contohnya adalah proses galvanisasi (pelapisan dengan Zn, gambar 6.2) pada baja. Baja dilapisi Zn bukan karena Zn memiliki ketahanan korosi yang tinggi tetapi karena Zn “diumpangkan” sehingga diharapkan akan terkorosi lebih dahulu.

Korosi galvanis dapat terjadi pada sel elektroda yang tidak sama. Hal ini diakibatkan adanya perbedaan potensial antara material yang satu dengan yang lainnya. Contoh: pipa tembaga (Cu) dan pipa baja. Beberapa jenis korosi galvanik adalah sebagai berikut:

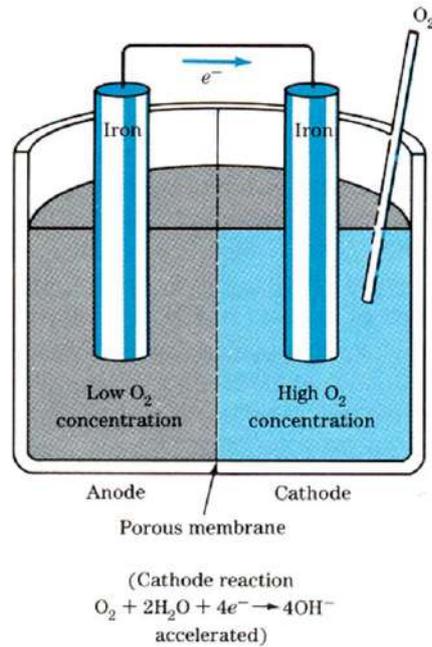
- Sel konsentrasi (*concentration cell*), yaitu material yang memiliki konsentrasi larutan yang berbeda. Sebagai contoh (gambar 6.3) sel konsentrasi ion (ion-concentration cell) dengan dua elektroda besi dimana kedua elektroda tersebut dilarutkan didalam larutan dengan konsentrasi yang berbeda. Sebagai akibatnya maka elektroda besi dengan konsentrasi larutan yang rendah akan berfungsi sebagai anoda dan yang lainnya akan berfungsi sebagai katoda. Dengan demikian maka telah terjadi proses korosi.
- Sel konsentrasi (*concentration cell*), yaitu material yang memiliki konsentrasi larutan yang berbeda. Sebagai contoh (gambar 6.3) sel konsentrasi ion (ion-concentration cell) dengan dua elektroda besi dimana kedua elektroda tersebut dilarutkan didalam larutan dengan konsentrasi yang berbeda. Sebagai akibatnya maka elektroda besi dengan konsentrasi larutan yang rendah akan berfungsi sebagai anoda dan yang lainnya akan berfungsi sebagai katoda. Dengan demikian maka telah terjadi proses korosi.

- Sel dengan temperatur yang berbeda (*differential temperature cell*). Hal ini sering terjadi pada *heat exchanger, boiler, immersion heater*. Contoh: Cu di dalam larutan  $\text{Cu SO}_4$  pada temperatur yang tinggi berfungsi sebagai katode dan elektrode Cu pada temperatur rendah berfungsi sebagai anode.



Gambar 6.3. Ilustrasi sel konsentrasi sehingga terjadi korosi galvanis

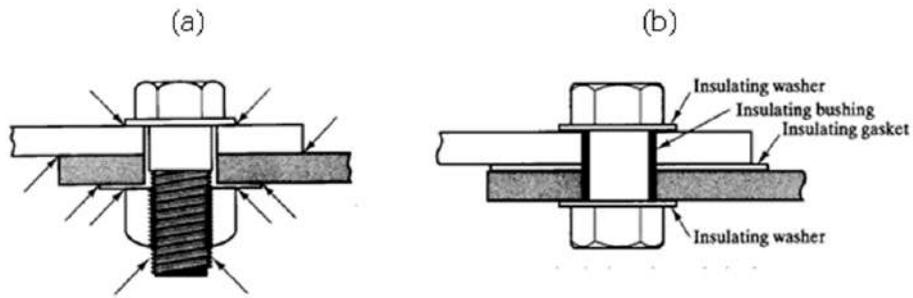
- Sel konsentrasi oksigen (*differential aeration cell*). Proses korosi galvanis juga terjadi bila terdapat perbedaan konsentrasi oksigen meskipun materialnya sama (gambar 6.4). Material yang berada pada konsentrasi oksigen lebih rendah akan berfungsi sebagai anoda dan material yang berada didalam konsentrasi oksigen yang lebih tinggi akan menjadi katoda.



Gambar 6.4. Ilustrasi sel konsentrasi oksigen.

#### 6.4 Korosi celah (*Crevice Corrosion*).

Korosi setempat/lokal yang sering terjadi pada celah atau daerah yang dilindungi dari permukaan logam yang berhubungan dengan lingkungan yang korosif. Pada umumnya jenis korosi ini jumlahnya kecil dan penyebab utamanya adalah adanya larutan yang terjebak pada lubang dari permukaan gasket, lap joint, kotoran-kotoran serta celah di bawah baut dan kepala rivet seperti pada gambar 6.5. Pencegahannya hanya dilihat kasus perkusus dan tidak ada cara yang ampuh.



Gambar 8.4 (a) Kemungkinan terjadinya korosi celah; (b) Cara pencegahannya

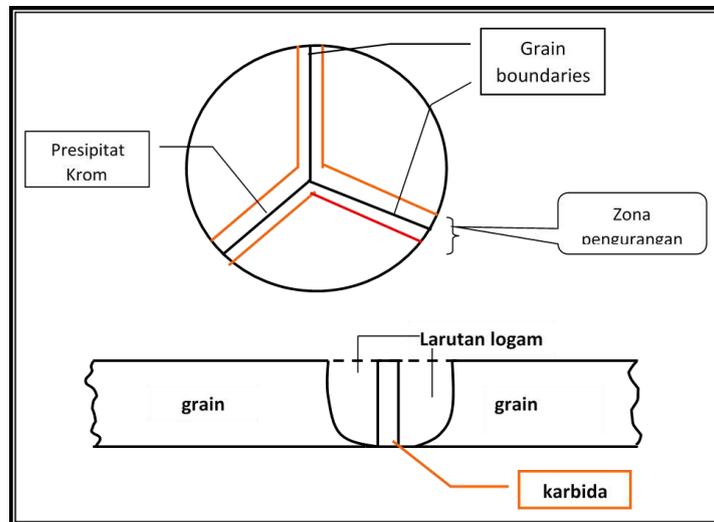
### 6.5 Korosi sumur (*Pitting Corrosion*).

Korosi sumur adalah bentuk serangan korosi yang menghasilkan lubang-lubang pada logam. Diameter lubang tersebut secara umum relatif kecil. Korosi ini adalah salah satu jenis korosi yang sangat berbahaya karena sulit untuk mendeteksi dan mengukur secara kualitatif, bahkan dalam skala laboratorium. Pencegahannya adalah proses penggunaan material yang tahan terhadap korosi celah atau dengan melakukan tes di lab.

### 6.6 Korosi Batas Butir (*Intergranular Corrosion*).

Korosi yang terjadi pada batas butir akibat adanya ketidak-murnian (*impurities*) yang terbentuk di batas butir terutama produk pengecoran akibat adanya perbedaan laju pendinginan saat proses pembekuan. Biadanya yang terjadi adalah bertambahnya salah satu dari elemen paduan di batas butir, atau pengurangan salah satu elemen paduan di batas butir. Contoh: pengurangan Cr di

batas butir akibat peristiwa sensitasi (sensitizing) akan menyebabkan pitting corrosion (gambar 6.7).



7.7

Gambar 6.7 Ilustrasi Korosi pada Batas Butir

### 6.7 Korosi Selektif (*Selective Leaching*).

Adalah proses penghilangan satu elemen dari suatu paduan padat melalui proses korosi. Contoh yang umum adalah terjadinya penghilangan Zn pada paduan brass (kuningan) yang disebut dengan *dezincification*. Contoh lainnya adalah penghilangan Al, Co, Fe, Cr, dari paduannya. Proses pencegahan korosi tipe ini adalah dengan mengurangi zat-zat yang agresif pada fluida (lingkungan), melakukan proteksi katodik, atau mengurangi kandungan unsur yang terkorosi misalnya Red Brass (15 % Zn).

## **6.8 Korosi Erosi (*Erosion Corrosion*).**

Adalah proses korosi yang semakin dipercepat lajunya karena adanya gesekan antara fluida yang korosif dengan permukaan logam. Pencegahannya adalah dengan membuat pelapisan (*coating*) dengan permukaan yang keras, atau melakukan proteksi katodik seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya.

## **6.9 Korosi Tegangan (*Stress Corrosion*).**

Korosi jenis ini sering disebut juga *stress corrosion cracking*, yaitu retak (*crack*) yang disebabkan adanya gabungan antara tegangan tarik (*tensile stress*) dengan korosi yang spesifik pada tingkatan medium (sedang). Yang termasuk dalam kategori korosi ini adalah *Hydrogen Embrittlement*. Adapun pencegahannya adalah dengan proteksi katodik, menurunkan tegangan yang bekerja, menghilangkan zat-zat yang korosif di lingkungan kerja material yang bersangkutan, pelapisan (*coating*), *shot-peening* atau *shot-blasting* yang menghasilkan tegangan sisa tekan pada permukaan logam.

## **6.10 Korosi Lelah (*Corrosion Fatigue*).**

Terjadi akibat adanya beban yang berulang dan di 'perburuk' dengan lingkungan kerja yang korosif sehingga mempercepat laju korosi dan kerusakan material. Pencegahan secara umum adalah mampu memilih material yang sesuai

atau proses disain yang perlu mempertimbangan lingkungan kerja sebelum memilih material yang tepat.

### 6.11 Pencegahan Korosi.

Korosi dapat dikontrol atau diperlambat lajunya dengan berbagai cara dan sangat spesifik pada lingkungan kerjanya. Akan tetapi pertimbangan utama adalah masalah ekonomi, terutama apabila metoda pencegahan korosi akan mengakibatkan biaya yang lebih besar jika dibandingkan dengan mengganti komponen-komponen yang terkena korosi tersebut. Metoda yang umum digunakan untuk mengontrol laju korosi adalah seperti ilustrasi pada gambar 6.8.



Gambar 6.8 Ilustrasi control laju korosi

## DAFTAR PUSTAKA

1. Callister, William D, Material Science and Technoligy: an Introduction, John Wiley & Son, Singapore, 2007.
2. Callister, William D, Jr, Fundametal of Materials Science and Engineering, 2nd edition, John Wiley & Son, USA, 2005.
3. Smith, William F, Principles of Material science and Engineering, 3th edition, McGraw-Hill, Singapore, 1996.
4. Ashby, Michael F, Material Selection in Mechanical Design, 3th edition, Elsevier Butterworth Heinemann, Singapore 2005.
5. Kalpakjian, Serope, Steven R Schmid, Manufacturing Process for Engineering Materials, 4th Edition, Prentice Hall, Singapore, 2003.
6. Moniz, B J, Metallurgy, American Technical Publishers, Inc., USA, 2003.
7. Dieter, George E, Mechanical Metallurgy, SI Matric Edition, McGraw-Hill, Singapore, 1988.
8. Fontana, Mars G, Corrosion Engineering, 3th edition,
9. <https://www.dau.edu/acquipedia-article/corrosion-prevention-and-control-cpc>
10. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9918216/>.