

METALURGI FISIK (*PHYSICAL METALLURGY*)



Disusun oleh:

Dr. Frans Robert Bethony, S.T., M.T.

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA TORAJA
(UKI TORAJA)**

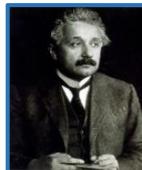
**Jl. Nusantara No. 12 Makale – Tana Toraja
Sulawaesi Selatan
Tahun 2022**

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan yang Maha Esa yang telah melimpahkan kasih dan karunia-Nya sehingga penyusunan bahan ajar yang berjudul Metalurgi Fisik (*Physical Metallurgy*) ini dapat terselesaikan. Bahan ajar ini disusun dengan tujuan untuk menambah wawasan bagi mahasiswa/i Progam Studi Teknik Mesin Faklutas Teknik Universitas Kristen Indonesia Toraja (PSTM-FT-UKI Toraja) tentang pengetahuan dasar-dasar Metalurgi Fisik (*Physical Metallurgy*).

Penyusunan bahan ajar ini terdiri dari tujuan pembelajaran, uraian materi, diskusi dan evaluasi dari hasil pembelajaran. Tujuan pembelajaran dimaksudkan untuk memberikan batasan agar mahasiswa/i lebih terarah dalam memahami tentang dasar-dasar ilmu metalurgi. Uraian materi dimaksudkan untuk memberikan pengetahuan kepada mahasiswa/i PSTM-FT-UKI Toraja. Dalam uraian materi banyak dilengkapi dengan ilustrasi untuk memberikan gambaran kepada mahasiswa/i. Adapun pada bagian evaluasi digunakan untuk mengetahui sejauh mana mahasiswa/i menyerap materi yang telah disajikan.

Disadari bahwa bahan ajar ini dalam penyusunannya masih jauh dari kata sempurna. Maka dari itu, kritik dan saran sangat diharapkan untuk demi kesempurnaan bahan ajar ini. Semoga bahan ajar ini bermanfaat dan dapat memberikan sumbangsih dalam pengembangan ilmu pengetahuan.



Albert Einstein (1879-1955)
"Science without Religion is Lamé
Religion without science is Blind"

Makale, 30 Nopember 2022

Penulis,

Dr. Frans Robert Bethony, S.T., M.T.

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iii
BAB I INDUSTRI MINERAL DAN BIJIH LOGAM (<i>MINERAL AND METALS ORE INDUSTRY</i>)	1
A. Capaian Pembelajaran	1
B. Penyajian Materi	1
1.1. Ilmu Metalurgi Fisik (<i>Physical Metallurgy Science</i>)	1
1.2. Penambangan Mineral (<i>Mining of Mineral</i>)	1
1.3. Pengolahan Mineral (<i>Processing of Mineral</i>)	2
1.4. Peleburan Bijih Logam (<i>Smelting of Metals Ore</i>)	4
1.5. Pengolahan Peleburan Logam (<i>Smelting Processing of Metals</i>)	7
C. Latihan Soal	11
BAB II JENIS-JENIS DAN STANDARISASI LOGAM (<i>DIVERSITY AND STANDARDIATION OF METALS</i>)	12
A. Capaian Pembelajaran	12
B. Penyajian Materi	12
2.1. Logam Besi (<i>Ferro of Metal</i>)	12
2.2. Logam Non-Besi (<i>Non-Ferro of Metal</i>)	15
2.3. Besi Tuang (<i>Cast Iron</i>)	18
2.4. Baja Besi (<i>Ferro of Steel</i>)	19
2.5. Standarisasi Logam (<i>Standardization of Metals</i>)	21
C. Latihan Soal	21
BAB III SIFAT-SIFAT MEKANIK, FISIK, KIMIA, DAN TEKNOLOGI LOGAM (<i>MECHANICAL, PHYSICAL, CHEMICAL, AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF METALS</i>)	23
A. Capaian Pembelajaran	23
B. Penyajian Materi	23
3.1. Sifat-sifat Mekanik Logam (<i>Mechanical Properties of Metals</i>)	24
3.2. Sifat-sifat Fisik Logam (<i>Physical Properties of Metals</i>)	29

3.3. Sifat-sifat Kimia Logam (<i>Chemical Properties of Metals</i>)	31
3.4. Sifat-sifat Teknologi Logam (<i>Tehnological Properties of Metals</i>)	33
3.5. Uji Ketangguhan Logam (<i>Impact Test of Metals</i>)	33
3.6. Uji Kekerasan Logam (<i>Hardness Test of Metals</i>)	33
3.7. Uji Metalografi Logam (<i>Metallography Test of Metals</i>)	40
C. Latihan Soal	44
BAB IV IKATAN ATOM DAN STRUKTUR MIKRO LOGAM (ATOMIC BONDS AND MICROSTRUCTURE OF METALS)	44
.....	Erro
r! Bookmark not defined.	
A. Capaian Pembelajaran	45
B. Penyajian Materi	45
4.1. Ikatan Atom Logam (<i>Atomic Bonds of Metals</i>)	46
4.2. Jenis-jenis Ikatan Atom Logam (<i>Types of Atomic Bonds of Metals</i>)	46
4.3. Struktur Mikro Logam (<i>Microstructure of Metals</i>)	52
4.4. Struktur Non-Kubik Logam (<i>Non-Cubic Structure of Metals</i>)	57
C. Latihan Soal	57
BAB V KETIDAKSEMPURNAAN LOGAM (IMPERFECTION OF METALS) ..	59
A. Capaian Pembelajaran	59
B. Penyajian Materi	59
5.1. Cacat Kristal Logam (<i>Crystal Defect of Metals</i>)	59
5.2. Ketidaktempurnaan Kristal Logam (<i>Crystalline Disability of Metals</i>)	62
5.3. Deformasi Logam (<i>Deformation of Metals</i>)	65
5.4. Rekristalisasi Logam (<i>Recrystallization of Metals</i>).....	66
C. Latihan Soal	67
BAB VI DIAGRAM FASA LOGAM (PHASE DIAGRAM OF METALS)	68
A. Capaian Pembelajaran	68
B. Penyajian Materi	68
6.1. Diagram Fasa Logam-Karbon (<i>Phase Diagram of Carbon- Metals</i>)	68
6.2. Struktur Mikro dan Pengaruhnya Terhadap Sifat Mekanik Logam (<i>Micristucture and its Effect on Mechanical Properties of Metals</i>).....	71
6.3. Diagram TTT Logam (<i>Time -Temperature – Transformation of Metals</i>)	73

6.4. Diagram CCT Logam (<i>Cooling Continues Transformation Diagram of Metals</i>)	74
.....	74
C. Latihan Soal	76
BAB VII PERLAKUAN PANAS LOGAM (<i>HEAT TREATMENT OF METALS</i>) .	77
A. Capaian Pembelajaran.....	77
B. Penyajian Materi	77
7.1. Proses Anil Logam (<i>Annealing Process of Metals</i>)	77
7.2. Proses Normalisasi Logam (<i>Normalizing Process of Metals</i>)	79
7.3. Proses Pengerasan Logam (<i>Hardening Process of Metals</i>)	79
7.4. Proses Temper Logam (<i>Tempering Process of Metals</i>)	82
C. Latihan Soal	82
BAB VIII PERLAKUAN PERMUKAAN LOGAM (<i>SURFACE TEATMENT OF METALS</i>)	85
A. Capaian Pembelajaran	85
B. Penyajian Materi	85
8.1. Proses Pengarbonan Logam (<i>Carburizing Process of Metals</i>)	85
8.2. Proses Nitridasi Logam (<i>Nitriding Process of Metals</i>)	88
8.3. Proses Pengerasan Induksi Logam (<i>Induction Hardening Process of Metals</i>)	
.....	89
8.4. Proses Pengerasan Nyala Api Logam (<i>Flame Hardening Process of Metals</i>)	
.....	90
C. Latihan Soal	91
DAFTAR PUSTAKA	92
RPS	94

BAB I

INDUSTRI MINERAL DAN BIJIH LOGAM *(MINERAL AND METALS ORE INDUSTRY)*

A. Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan materi ini, maka mahasiswa/i diharapkan mampu mengetahui, memahami dan menjelaskan tentang industri mineral dan bijih logam (*mineral and metals ore industry*) menjadi produk setengah jadi, hingga produk jadi bahkan kadang-kadang sampai pada produk siap pakai.

B. Penyajian Materi

1.1. Ilmu Metalurgi Fisik (*Physical Metallurgy Science*)

Ilmu metalurgi fisik (*physical metallurgy science*) merupakan ilmu metalurgi fisik atau biasa juga menggunakan istilah ilmu fisik logam, yaitu suatu ilmu yang mempelajari sifat-sifat kimia dari suatu logam dan cara pemrosesannya mulai dari mineral sampai menjadi produk jadi. Kata “*Metallurgy*” sebenarnya berasal dari bahasa Yunani “*Metallougos*” yang merupakan istilah yang digunakan oleh ahli kimia untuk mendeskripsikan *mineral processing* atau *extraction* logam dari *mineral*. Pada masa modern istilah metalurgi fisik mulai meluas pengertian dan kajiannya menjadi ilmu yang mempelajari tentang logam, mulai dari proses pengambilannya dari mineral, bijih, manufaktur, karakterisasi, hingga rekayasa logam (Robert, W.C. and Peter, H. 1996).

1.2. Penambangan Mineral (*Mining of Mineral*)

Penambangan mineral (*mining of mineral*) merupakan suatu kegiatan proses penambangan mineral dan bijih logam. Logam dan logam lain diperoleh dari alam dalam bentuk bijih berupa pasir logam atau bebatuan yang mengandung mineral logam. Untuk menjadi logam yang bernilai ekonomis, bijih logam ditambang dan melewati proses pemurnian. Pada saat penambangan, bijih logam masih berupa senyawa oksida yang bercampur sulfida dan silikat. Logam digolongkan menjadi dua, yaitu logam fero yang memiliki sifat magnetis dengan logam (Fe) sebagai unsur utama. Kedua adalah logam non-fero yang tidak memiliki sifat magnetik seperti tembaga, aluminium, titanium dan magnesium. Selain itu juga terdapat logam yang bukan besi merupakan, senyawa seperti emas dan perak.

Penambangan dilakukan dengan cara pengerukan bebatuan/pasir dari alam untuk diolah. Jika diperlukan, bahan peledak digunakan untuk memperoleh bongkahan batu tambang. Bongkahan tersebut kemudian dihancurkan menjadi ukuran yang lebih kecil,

kemudian diayak. Serbuk hasil ayakan ini nantinya akan diolah dalam proses pemurnian. Proses penambangan dilakukan dengan dua cara, yaitu penambangan terbuka/di atas permukaan tanah dengan cara pengerukan langsung menggunakan alat-alat berat. Bebatuan dipecah dengan ripper bulldozer, atau mesin impact yang dipasang pada lengan excavator. Pecahan batu kemudian dikeruk oleh excavator untuk dibawa oleh dump truck ke tempat penghancuran batu. Cara kedua adalah dengan penambangan tertutup/di bawah permukaan tanah dengan cara membuat terowongan/terowongan. Melalui terowongan itu para pekerja memperoleh bongkahan-bongkahan batu, dan bongkahan itu kemudian diangkut menggunakan kereta/lori menuju tempat penghancuran batu.

Pada penambangan terbuka, lubang-lubang yang menganga hasil penggalian kemudian diurug kembali dan ditanami pepohonan agar tidak memberikan dampak negatif terhadap lingkungan.

1.3. Pengolahan Mineral (*Processing of Mineral*)

Pengolahan mineral (*processing of mineral*) merupakan tahap awal dari pemrosesan logam. *Mineral processing* atau biasa juga disebut *mineral dressing* masuk dalam kategori *physical metallurgy extraction*. *Physical metallurgy extraction* ini mencakup proses dan metode dari pengekstraksian logam dari tambang mineral di alam. Yaitu seperti pemurnian mineral, pemisahan, proses-proses kimia, dan ekstraksi logam murni dari paduannya. Setiap jenis logam membutuhkan metode *extraction* yang berbeda, oleh karena itu kajian *metallurgy extraction* sangat bervariasi dan berkembang tergantung dari jenis-jenis logam yang tersedia di alam.

Secara umum proses *physical metallurgy extraction* dibagi menjadi tiga antara lain:

1. Pyrometallurgy

Proses *pyrometallurgy* merupakan pengambilan logam dari bijihnya dengan menggunakan temperatur tinggi dimana terjadi reaksi kimia antara fase *gas*, *solid* dan *liquid*. Proses *pyrometallurgy* yang melibatkan fase *gas* dan *solid* disebut *calcining* dan *roasting*. Sedangkan proses yang menghasilkan fase *liquid* disebut *smelting*.

2. Electrometallurgy

Proses *electrometallurgy* merupakan proses *extraction* dan pemurnian yang melibatkan energi listrik sebagai dasar dalam proses ekstraksi. *Electrometallurgy* melibatkan dua prinsip *electrolysis* dan *electrochemistry*. Proses yang paling umum dalam *electrometallurgy* adalah *electrowinning* dan *electrorefining*.

3. Hydrometallurgy

Proses *hydrometallurgy* merupakan proses yang melibatkan larutan *aqueous* untuk mengekstraksi logam dalam bijihnya. Proses pertama dalam *hydrometallurgy* adalah *leaching*, yaitu dengan cara menguraikan bijih logam dalam larutan air atau pelarut lainnya. Setelah itu larutan mengalami berbagai macam proses pemurnian dan penguatan konsentrasi sebelum logam tersebut diambil baik dalam keadaan logam murni maupun sebagai senyawa kimia. Proses ini meliputi *precipitation*, *distillation*, *adsorption*, dan *solution extraction*.

Sedangkan untuk *mineral processing* sendiri memiliki unit-unit operasi pemrosesan mineral, beberapa diantaranya sebagai berikut:

1. *Comminution*

Comminution (penumbukan) merupakan operasi pertama dalam pemrosesan mineral. Mineral yang diambil dari alam direduksi ukurannya dengan berbagai cara agar ukurannya sesuai dan lebih mudah untuk diproses dalam proses-proses ekstraktif selanjutnya. Cara yang paling umum adalah dengan dihancurkan (*crushing*) dan digiling (*grinding*). Reduksi ukuran partikel dilakukan dengan tiga jenis kekuatan: kompresi, impact, dan atrisi.

2. *Sizing*

Sizing (ukuran partikel) merupakan proses utama dalam pemisahan partikel yang menggunakan dasar perbedaan ukuran partikel. Salah satu prosesnya yaitu *screening*, yaitu dengan cara melewatkan partikel melewati penyaring. Proses *screening* ini bias dilakukan secara statis (hanya partikel yang bergerak) ataupun dinamis dengan penambahan goncangan.

3. *Concentration*

Concentration adalah proses peningkatan konsentrasi kandungan logam agar menjadi layak untuk dilakukan proses ekstraksi logam. Proses dan metodenya sangat bervariasi tergantung dari sifat fisika dan kimia dari mineral tersebut.

4. *Gravity Separation*

Gravity separation merupakan proses pemisahan mineral berdasarkan perbedaan gravitasi spesifik dari setiap mineral yang berbeda. Pemisahannya dilakukan cara menggunakan media tertentu seperti fluida kental maupun media buatan seperti spiral separators.

5. *Froth Flotation*

Froth flotation (flotasi buih) merupakan proses yang penting dalam peningkatan konsentrasi mineral. Proses ini dapat digunakan untuk memisahkan dua partikel yang berbeda dan dilakukan berdasarkan reaksi kimia permukaan dari partikel.

1.4. Peleburan Bijih Logam (*Smelting of Metals Ore*)

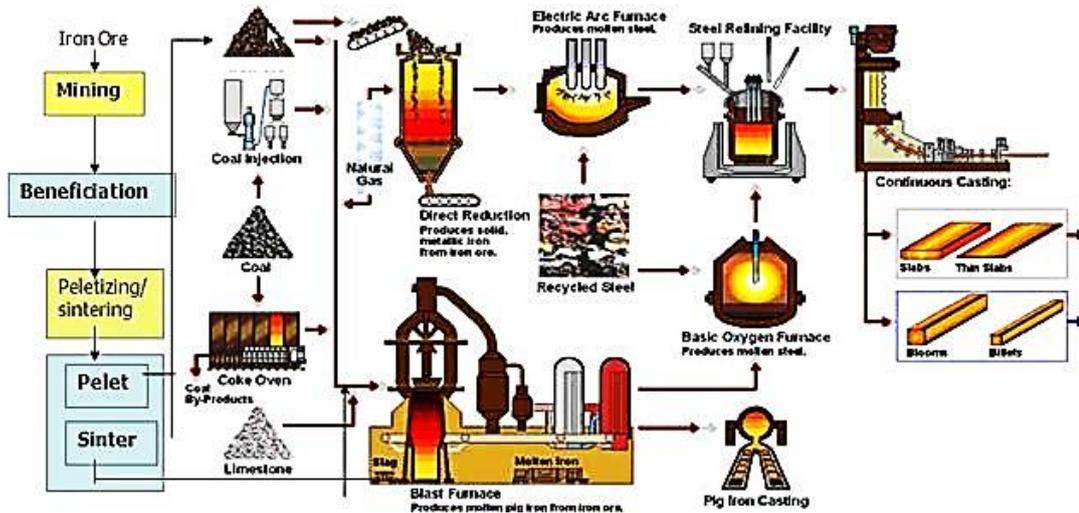
Peleburan bijih logam (*smelting of metals ore*) dilakukan dengan terlebih dahulu mencampurkan bijih logam murni (Fe_2O_3) dengan kapur (*lime stone*/ CaCO_3) dan batu bara/kokas (*coal*) melalui proses *sintering*. Campuran tersebut kemudian dimasukkan ke dalam pemanas berputar dan kemudian dimasukkan ke dalam pendingin berputar dan dilewatkan melalui magnetic separator untuk memisahkan logam spon dengan kapur dan kokas. Produk dari sintering adalah logam spon (*sponge iron*). Tujuan sintering ini adalah untuk memudahkan proses pencairan logam pada saat berada dalam tanur (*furnace*).



Gambar 1.1. Logam Sponge Hasil Proses *Sintering*

Sumber: <https://5.imimg.com/data5/EM/WY/MY-24060829/sponge-iron.jpg>

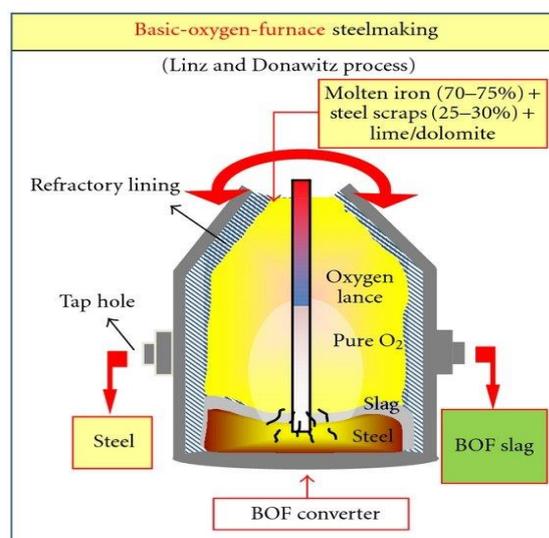
Proses selanjutnya, logam spon dimasukkan ke dalam tanur tinggi (*blast furnace*) dengan menggunakan *skip car* karena tanur memiliki tinggi 30-35 meter dengan diameter tanur mencapai 7 meter. Dalam tanur yang memiliki temperatur 1650°C pada bagian bawah karena hembusan udara panas. Dengan temperatur panas dan kokas akan menghasilkan gas CO yang menjadi reduktor logam dalam keadaan cair. Metode ini disebut reduksi tidak langsung. Pada metode yang lebih cepat digunakan metode reduksi langsung, di mana gas reduktornya berupa gas alam yang dimasukkan. Reduksi langsung menggunakan metode Midrex, HYL-I, HYL-II, dan HYL-III. Batu kapur yang ikut dimasukkan bereaksi dengan kotoran logam dan membentuk slak yang terapung di bagian atas logam cair dan ditampung oleh *slag car*. Logam cair yang dihasilkan dari proses reduksi ini disebut logam kasar (*pig iron*) yang merupakan produk antara yang harus melalui tahap pemurnian berikutnya. Mengingat kandungan karbonnya masih berkisar 3-4%. Logam cair tersebut ditampung dengan kendaraan khusus yang disebut *torpedo car*.



Gambar 1.2. Tanur Tinggi (*Blast Furnace*)

Sumber: <https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid>

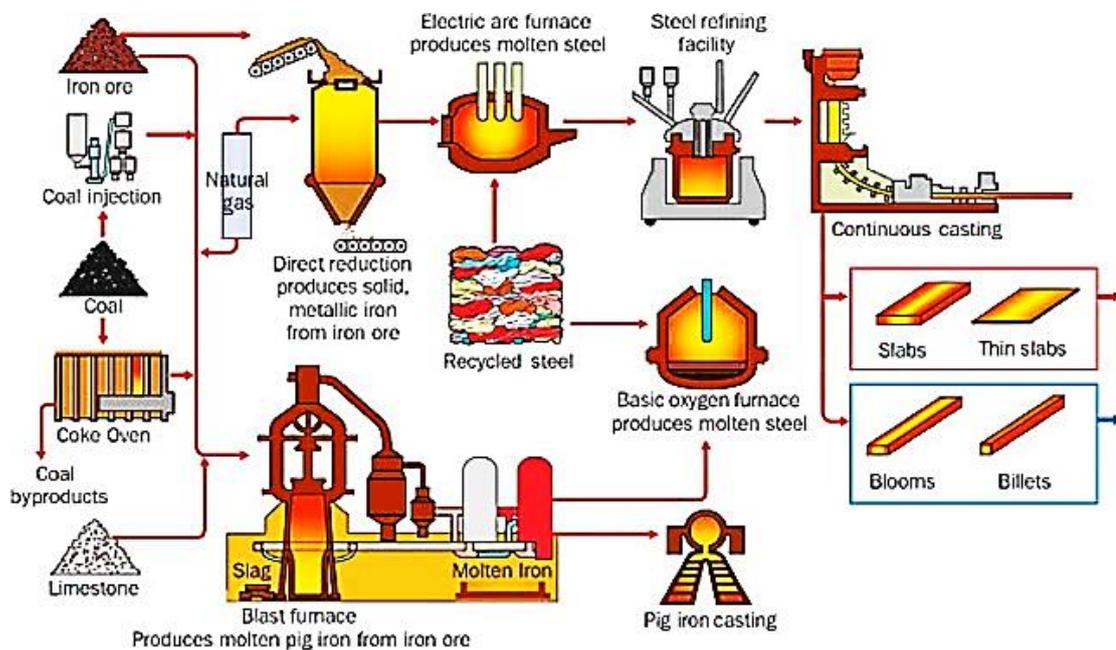
Pemurnian logam kasar untuk menurunkan kadar karbonnya dilakukan dengan cara melebur kembali ke dalam dapur oksigen basa (*Basic Oxygen Furnace - BOF*) atau dapur busur listrik (*Electric Arc Furnace - EAF*). Pemurnian logam kasar menggunakan BOF dilakukan dengan memasukkan logam kasar/pig iron (75%), logam bekas/scrap (25%), batu kapur dan dengan meniupkan oksigen ke dalam logam yang telah cair dalam dapur, sehingga terjadi reaksi yang mengeluarkan karbon monoksida dan dengan sendirinya kadar karbon logam cair akan turun. Selain itu batu kapur juga dimasukkan dalam proses ini dengan tujuan mengangkat pengotor dan mengangkatnya menjadi terak. Sebagian besar produksi baja menggunakan BOF. Alasannya karena waktu yang diperlukan untuk pemurnian lebih singkat.



Gambar 1.3. *Basic Oxygen Furnace (BOF)*

Sumber: <http://www.steelworks.us/wp-content/uploads/2016/03/blastfurnace.jpg>

Proses pemurnian dalam EAF dilakukan dengan cara memasukkan logam kasar/spong iron ke dalam tungku secara bertahap dengan dicampurkan logam scrap, oksigen dan kapur. Pada bagian atas tungku dipasang katoda, dan pada bagian bawah tungku dipasang anoda. Pada saat dialiri katoda dan anoda dialiri listrik, maka akan menimbulkan panas pada elektroda katoda yang jaraknya cukup sempit dengan permukaan logam. Panas itu mampu melebur logam. Oksigen yang dialirkan akan menurunkan kadar karbon logam cair. Sementara batu kapur yang dimasukan akan mengikat kotoran semisal sulfur, fosfor, silikon, alumunium menjadi terak. Dengan demikian produk yang dihasilkan menjadi lebih murni yang disebut baja. Waktu yang diperlukan EAF dalam pemurnian lebih lama dibanding BOF, selain itu kualitas baja yang dihasilkan EAF lebih rendah dibandingkan BOF karena bahan terbanyak yang dimasukan adalah logam bekas/scrap.



Gambar 1.4. Electric Arc Furnace (EAF)

Sumber: <https://cdn.britannica.com/700x450/44/1544-004-153E461C.jpg>

Untuk memperoleh baja dengan kualitas yang lebih baik, maka produk BOF maupun EAF perlu dimurnikan kembali dengan pemurnian tahap kedua yang disebut pemurnian sekunder. Adapun dapur yang digunakan pada tahap pemurnian sekunder adalah *Ladle Furnace* (LF), *Argon-Oxygen Decarburization Furnace* (AOD), *Vacum-Oxygen Decarburization Furnace* (VOD), dan *RH type degasising unit* (RH). Produk yang dihasilkan dari proses pemurnian ini berupa *sheet product*, yaitu baja lempengan tebal (*slabs*)

atau lempengan tipis (*thin slabs*), dan *long product* berupa baja balok besar (*blooms*), baja balok kecil (*billets*) (Syaharuddin, R. 2014).

1.5. Pengolahan Peleburan Logam (*Smelting Processing of Metals*)

Pengolahan peleburan logam (*smelting processing of metals*) adalah suatu proses peleburan bijih logam yang diambil dari alam. Bijih logam terdiri atas oksigen dan atom logam yang berikatan bersama dalam molekul. Logam sendiri biasanya didapatkan dalam bentuk *magnetite* (Fe_3O_4), *hematite* (Fe_2O_3), *goethite*, *limonite* dan *siderite*. Bijih logam biasanya kaya akan logam oksida dan beragam dalam hal warna, dari kelabu tua, kuning muda, ungu tua, hingga merah karat. Saat ini, cadangan biji logam tampak banyak, namun seiring dengan bertambahnya penggunaan logam secara eksponensial berkelanjutan, cadangan ini mulai berkurang, karena jumlahnya tetap. Sebagai contoh, Lester B. dari *Worldwatch Institute* telah memperkirakan bahwa bijih logam bisa habis dalam waktu 64 tahun berdasarkan pada ekstrapolasi konservatif dari 2% pertumbuhan per tahun. (Goldstein, J.I. et al. 2009; Frey, P.A. and Reed, G.H. 2012).

Bijih logam batuan dan mineral dari mana logam-logam dapat secara ekonomis diekstrak. Bijih-bijih logam biasanya kaya oksida logam dan bervariasi dalam warna dari abu-abu gelap, kuning cerah, ungu dalam, menjadi merah berkarat. Logam itu sendiri biasanya ditemukan dalam bentuk *magnetite* (Fe_3O_4), *hematite* (Fe_2O_3), *goethite* ($\text{FeO}(\text{OH})$), *limonite* ($\text{FeO}(\text{OH})_n(\text{H}_2\text{O})$). Atau *siderite* (FeCO_3). Bijih membawa jumlah yang sangat tinggi dari hematite atau magnetit (lebih besar dari logam ~ 60%) yang dikenal sebagai "bijih alami" atau "bijih pengiriman langsung", yang berarti mereka dapat diberi makan langsung ke pembuatan logam *blast furnace*. Sebagian besar cadangan bijih tersebut kini telah habis. Bijih logam adalah bahan baku yang digunakan untuk membuat *pig iron*, yang merupakan salah satu bahan baku utama untuk membuat baja. 98% dari bijih logam ditambang digunakan untuk membuat baja. Memang, telah berpendapat bahwa bijih logam "yang lebih integral untuk ekonomi global daripada komoditas lainnya, kecuali mungkin minyak". Bijih logam sulfida, mineral utama adalah *pirite* dan *pirhotite*, tidak pernah digunakan secara langsung untuk produksi logam karena efek melemahnya sulfur pada paduan logam. Disisi lain, mereka merupakan bahan utama yang penting untuk produksi sulfur dioksida, diperoleh dengan memanggang. Masih ada residu oksida logam ("*pirite ash*") yang berbentuk bubuk dan mungkin masih mengandung sejumlah sulfur yang menyusahakan, oleh karena itu penggunaannya sebagai bijih logam dapat menimbulkan masalah.

Bijih logam karbonat, *siderite* atau siderosis, FeCO_3 , yang memberikan oksida pada kalsinasi. Di udara lembab, sideritis berubah menjadi lepidocrocitis atau, lebih jarang, goethitis. Siderit sering dikaitkan dengan pirit, magnesita, kapur, mangan. Kita dapat membedakan logam karbonat spatik, bijih kristal putih, agak kekuningan, sangat tersebar luas, dan sferosiderit, dalam massa bulat, dicampur dengan bahan tanah, jarang di Prancis. Bijih logam dari deposit batubara mengandung arang: warnanya hitam dan mudah dipanggang. Di Inggris dikenal sebagai *black band*.

Bijih logam magnetit, spinel ferrimagnetik Fe_3O_4 , adalah mineral logam terkaya dalam logam. Hal ini sering dikaitkan dengan hematit dalam deposit yang sama, tetapi deposit magnetit murni juga diketahui. Berat jenis 5.15, warna hitam, kilau logam, sering disertai dengan kotoran seperti silika, kapur, alumina dan fosfor.

Bijih logam hematit $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, merupakan komponen terpenting dari mineral logam yang diproses dalam industri baja. Ini memiliki beberapa jenis diantaranya:

- a) *Oligist* mengkristal dalam *rhombohedral*.
- b) *Specularite* terdiri dari agregat kristal *hematite* dengan permukaan yang halus seperti cermin.
- c) *Hematite* merah biasa terjadi pada massa berserat, atau kompak.
- d) *Hematite* merah *oolitic* terbentuk dari bola kecil yang *agglomerated*.
- e) *Martite* adalah *pseudomorphs hematite* dari *magnetite*.

Bijih logam *maghemite*, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, adalah bentuk hematit metastabil, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, yang terbentuk dari *magnetite* melalui oksidasi progresif. Ini memiliki karakteristik magnetik yang sama dengan *magnetite*, sedangkan *hematite* bersifat magnetis lemah. Strukturnya *spines*, tetapi dengan kekosongan atom logam.

Kandungan unsur mineral logam utama bervariasi dalam batas-batas khas:

1. *Magnetite* : Fe = 50 - 67%



Gambar 1.5. Bijih logam bersifat *magnetite*

Sumber: <https://www.google.ru/search?q=gambarbijihlogambersifatmagnetite>

2. *Hematite* : Fe = 30 - 65%



Gambar 1.6. Bijih logam bersifat *hematite*

Sumber: <https://www.google.ru/search?q=gambar+Bijih+logam+bersifat+hematite>

3. *Limonite* : Fe = 25 - 45%



Gambar 1.7. Bijih logam bersifat *Limonite*

Sumber: <https://www.google.ru/search?q=gambar+Bijih+logam+bersifat+Limonite>

4. *Siderite* : Fe = 30 - 40%



Gamba 1.8. Bijih logam bersifat *Siderite*

Sumber: <https://www.google.ru/search?q=gambar+Bijih+logam+bersifat+Siderite>

Tabel 1.1. Unsur Mineral Logam Utama

Mineral	Rumus kimia	Kandungan logam teoritis dalam mineral (dalam%)	Kandungan logam teoritis setelah kalsinasi (dalam%)
<i>Hematite</i>	Fe ₂ O ₃	69,96	69,96
<i>Magnetite</i>	Fe ₃ O ₄	72,4	72,4
<i>Magnesioferrite</i>	MgOFe ₂ O ₃	56-65	56-65
<i>Goetite</i>	Fe ₂ O ₃ H ₂ O	62,9	70
<i>Hydrogæthite</i>	3Fe ₂ O ₃ 4H ₂ O	60,9	70
<i>Limonite</i>	2Fe ₂ O ₃ 3H ₂ O	60	70
<i>Siderite</i>	FeCO ₃	48,3	70
<i>Pirite</i>	FeS ₂	46,6	70
Pyrrhotite	Fe _{1-x} S	61,5	70
Ilmenite	FeTiO ₃	36,8	36,8

Sumber: <https://www.google.ru/search?q=tabelunsurminerallogamutama#imgrc>

Besi *metallic* hampir tidak dikenal di permukaan Bumi kecuali sebagai besi-nikel paduan dari *meteorite* dan bentuk yang sangat jarang *xenoliths mantel* yang mendalam. Meskipun zat besi adalah unsur yang paling berlimpah keempat dalam kerak bumi, yang terdiri dari sekitar 5%, sebagian besar terikat dalam mineral silikat atau karbonat lebih jarang. Hambatan termodinamika untuk memisahkan besi murni dari mineral-mineral yang tangguh dan energi yang intensif, oleh karena itu semua sumber besi yang digunakan oleh industri manusia mengeksploitasi mineral oksida besi relatif jarang, bentuk utama yang digunakan sedang hematit. Sebelum revolusi industri, besi sebagian besar diperoleh dari *goethite* banyak tersedia atau bijih rawa, misalnya selama Revolusi Amerika dan perang-perang Napoleon. Masyarakat prasejarah digunakan laterit sebagai sumber bijih besi.

Secara historis, banyak bijih besi dimanfaatkan oleh masyarakat industri telah ditambang dari deposit didominasi hematit dengan nilai lebih dari 60% Fe. Deposit ini biasanya disebut sebagai "bijih pengiriman langsung" atau "bijih alami". Peningkatan permintaan bijih besi, ditambah dengan menipisnya bermutu tinggi bijih hematit di Amerika Serikat, setelah Perang Dunia II menyebabkan perkembangan tingkat rendah sumber bijih besi, terutama pemanfaatan taconite di Amerika Utara. Tingkat rendah sumber bijih besi umumnya memerlukan benefisiasi. *Magnetite* sering dimanfaatkan karena magnet, dan karenanya mudah dipisahkan dari mineral gangue dan mampu menghasilkan konsentrat bermutu tinggi dengan tingkat yang sangat rendah dari kotoran. Karena kepadatan yang tinggi

relatif terhadap gangue hematit silikat terkait, benefisi hematit biasanya melibatkan kombinasi dari menghancurkan, gravitasi penggilingan, atau berat pemisahan media, dan flotasi buih silika. Salah satu metode bergantung pada melewati bijih ditumbuk halus di atas penangas larutan yang mengandung bentonit atau agen lainnya yang meningkatkan densitas dari solusi. Saat densitas larutan benar dikalibrasi, hematit akan tenggelam dan fragmen mineral silikat akan mengapung dan dapat dihapus. Metode penambangan bijih besi berbeda-beda menurut jenis bijih yang ditambang. Ada empat jenis utama dari deposito bijih besi bekerja saat ini, tergantung pada mineralogi dan geologi dari deposito bijih. Ini adalah magnetit, titanomagnetite, hematit besar dan *deposito ironstone pisolitic*. (Frey, P.A. and Reed, G.H. 2012; Troll, V.R. et al. 2019; Muwanguzi, A.J.B. et al. 2012).

C. Latihan Soal

Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut untuk me-*review* kedalaman pemahaman Anda tentang materi pada BAB I!

1. Jelaskanlah, apa yang Anda ketahui tentang bijih logam!
2. Jelaskan juga apa yang Anda ketahui tentang bijih logam!
3. Jelaskan apa perbedaan penambangan terbuka dan penambangan tertutup!
4. Jelaskan cara pemisahan bijih logam dengan unsur lain dalam bijih logam!
5. Apa yang anda ketahui dengan proses sintering?
6. Jelaskan perbedaan proses reduksi langsung dan tidak langsung dalam proses peleburan logam!
7. Jelaskan kegunaan kokas dan batu dalam proses peleburan logam!
8. Apa yang Anda ketahui tentang sponge iron dan pig iron?
9. Jelaskan kelebihan dan kekurangan dapur pemurnian baja BOF dan EAF!
10. Berikan contoh-contoh produk baja setelah melalui proses pemurnian dan pembentukan!

BAB II

JENIS-JENIS DAN STANDARISASI LOGAM *(DIVERSITY AND STANDARDIATION OF METALS)*

A. Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan materi ini, maka mahasiswa/i diharapkan mampu mengetahui, memahami, membedakan serta menjelaskan tentang jenis-jenis logam serta standarisasi logam (*diversity and standardiation of metals*) yang sudah umum dalam industri dan permesinan.

B. Penyajian Materi

2.1. Logam Besi (*Ferro of Metals*)

Logam besi (*ferro of metal*) sebagaimana telah dibahas terbatas dalam pertemuan sebelumnya, bahwa logam terdiri dari dua jenis, yaitu logam *ferro* (Fe) dan *non-ferro*. *Ferro* memiliki sifat magnetis karena unsur utamanya adalah logam. Hampir 90% bahan logam yang digunakan sebagai logam teknik adalah *ferro*. Pada dasarnya *ferro* dibedakan menjadi dua, yaitu logam tuang dan baja. Perbedaan keduanya terletak pada prosentase berat karbon. Logam tuang memiliki kadar karbon 2% hingga 4,5%. Sedangkan logam tuang memiliki kadar karbon antara 0,05 hingga 2%.

Logam *ferro* adalah sebuah logam paduan yang terdiri dari campuran unsur karbon dengan besi. Untuk menghasilkan suatu logam paduan yang mempunyai 2 sifat yang berbeda dengan besi dan karbon, maka dicampur dengan berbagai macam logam lainnya. Sementara pengertian logam adalah elemen kerak bumi (mineral) yang terbentuk secara alami, di mana jumlah logam diperkirakan 4% dari kerak bumi. Logam dalam bidang keteknisian adalah besi, yang biasanya dipakai untuk konstruksi bangunan-bangunan, pipa-pipa, alat-alat pabrik dan sebagainya.

Dalam dunia keteknikan misalnya, logam merupakan logam yang paling mendominasi dari bahan-bahan teknik lainnya sebagai bahan yang paling utama dalam pembuatan mesin. Sementara dipihak lain terutama di dunia pendidikan, kita di haruskan untuk mengerti unsur-unsur yang terkandung di dalam logam tersebut. (Dody, P. 2010).

Logam adalah unsur kimia yang mempunyai sifat-sifat tertentu, yaitu:

- a) Dapat ditempa dan diubah bentuknya.
- b) Penghantar panas dan listrik.
- c) Keras (tahan terhadap goresan, potongan atau keausan), kenyal (tahan patah bila dibentang), kuat (tahan terhadap benturan, pukulan martil), dan juga liat (dapat ditarik).

Logam *ferro* adalah logam besi (*Fe*). Besi merupakan logam yang penting dalam bidang teknik, tetapi besi murni terlalu lunak dan rapuh sebagai bahan kerja, bahan konstruksi dlln. Oleh karena itu besi selalu bercampur dengan unsur lain, terutama zat arang/karbon (*C*). Sebutan besi dapat berarti:

1. Besi murni dengan simbol kimia *Fe* yang hanya dapat diperoleh dengan jalan reaksi kimia.
2. Besi teknik adalah yang sudah atau selalu bercampur dengan unsur lain.

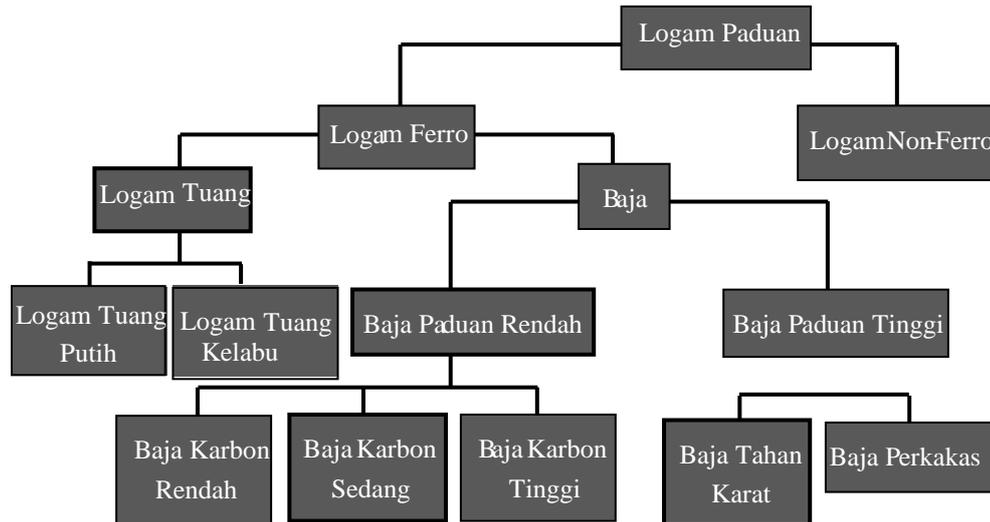
Besi teknik terbagi atas tiga macam yaitu:

- a) Besi mentah atau besi kasar yang kadar karbonnya lebih besar dari 3,7%.
- b) Besi tuang yang kadar karbonnya antara 2,3 sampai 3,6 % dan tidak dapat ditempa. Disebut besi tuang kelabu karena karbon tidak bersenyawa secara kimia dengan besi melainkan sebagai karbon yang lepas yang memberikan warna abu-abu kehitaman, dan disebut besi tuang putih karena karbon mampu bersenyawa dengan besi.
- c) Baja atau besi tempa yaitu kadar karbonnya kurang dari 1,7 % dan dapat ditempa.

Logam *ferro* juga disebut besi karbon atau baja karbon. Bahan dasarnya adalah unsur besi (*Fe*) dan karbon (*C*), tetapi sebenarnya juga mengandung unsur lain seperti: silisium, mangan, fosfor, belerang dan sebagainya yang kadarnya relatif rendah. Unsur-unsur dalam campuran itulah yang mempengaruhi sifat-sifat besi atau baja pada umumnya, tetapi unsur zat arang (karbon) yang paling besar pengaruhnya terhadap besi atau baja terutama kekerasannya.

Pembuatan besi atau baja dilakukan dengan mengolah bijih besi di dalam dapur tinggi yang akan menghasilkan besi kasar atau besi mentah. Besi kasar belum dapat digunakan sebagai bahan untuk membuat benda jadi maupun setengah jadi, oleh karena itu, besi kasar itu masih harus diolah kembali di dalam dapur-dapur baja. Logam yang dihasilkan oleh dapur baja itulah yang dikatakan sebagai besi atau baja karbon, yaitu bahan untuk membuat benda jadi maupun setengah jadi.

Logam merupakan logam yang dominan dan diperlukan dalam kehidupan manusia. Terutama adalah logam logam-baja yang banyak dimanfaatkan untuk keperluan konstruksi dan manufaktur. Selain ketersediaannya yang cukup banyak di alam, proses produksi logam logam-baja dan paduannya memerlukan ongkos yang tidak mahal. Selain itu sifat-sifat logam-baja mudah direkayasa sesuai dengan pemanfaatannya. Logam logam-baja diperoleh melalui proses penambangan, pemisahan bijih logam, dan reduksi (industri hulu), pengolahan bijih logam melalui pemurnian dan pemaduan (industri antara), dan pembentukan produk (industri hilir).

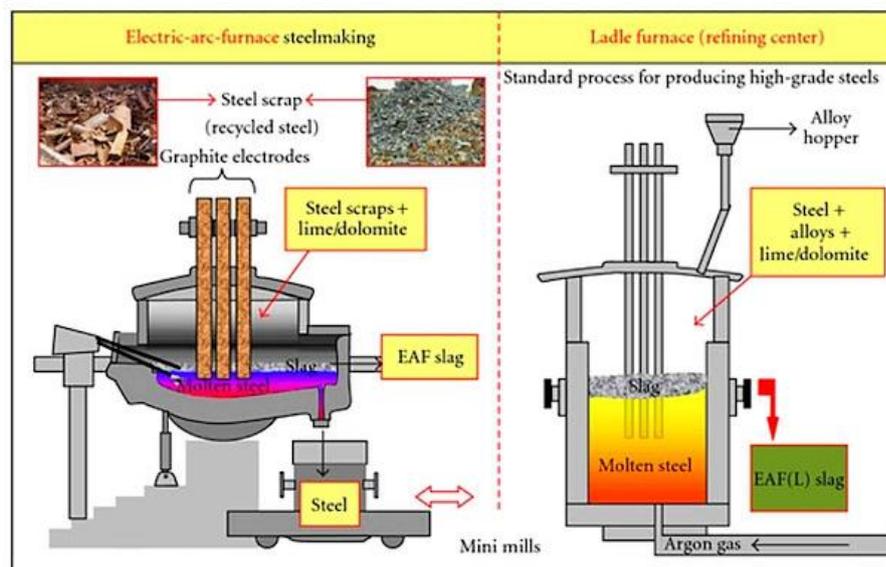


Gambar 2.1. Klasifikasi Paduan Logam

Sumber: Bondan T. Sofyan, 2010

Melalui proses pengolahan logam akan didapatkan berbagai produk setengah jadi yang nantinya akan diolah melalui pengerjaan lanjutan. Produk baja lempengan (*slabs*) akan diolah kembali melalui pemanas ulang untuk dijadikan pelat dengan ukuran lebih kecil dan tipis dan plat gulungan. Dengan mesin tube mill maka pelat dapat diolah menjadi lembaran baja tipis dan *welded tube* dalam berbagai ukuran.

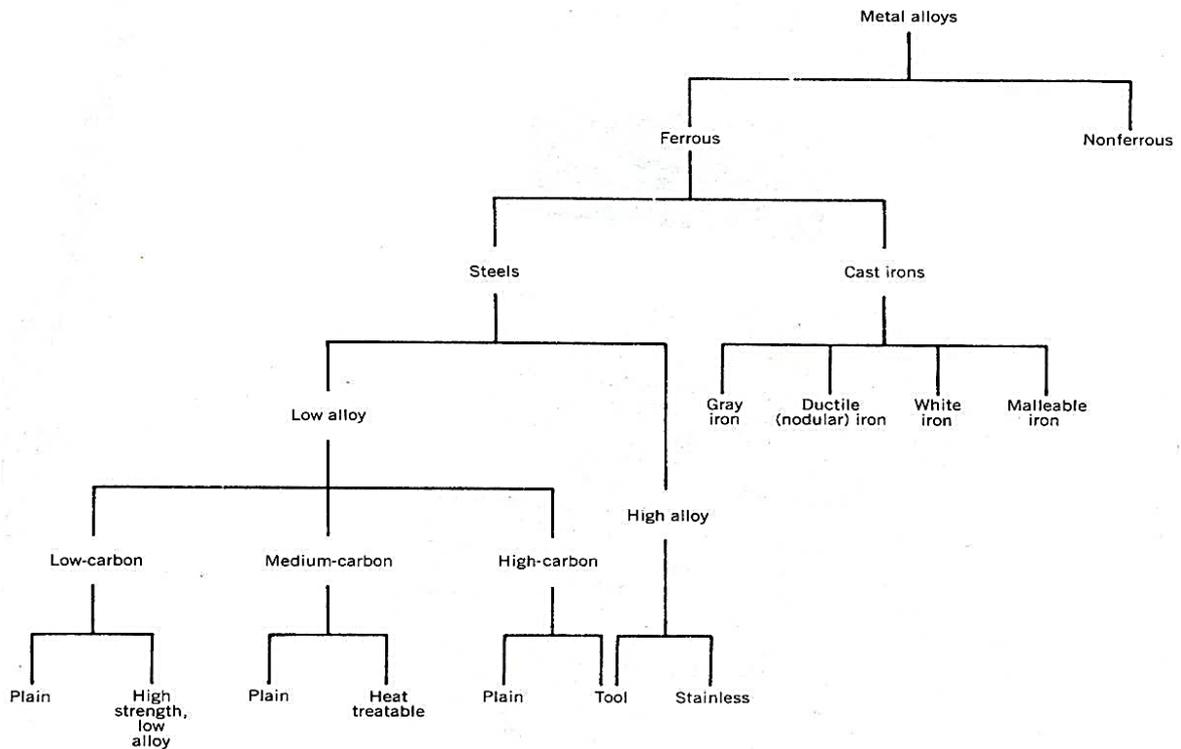
Adakalanya plat dan gulungan diberikan proses pengasaman sehingga diperoleh produk pickled dan oiled coils. Produk pelat dapat juga diolah dengan pengerolan dingin sehingga diperoleh baja gulungan dan lembaran canai dingin. Pada tahap akhir pembuatan produk dilakukan pemanasan kembali dan diberikan pelapisan.



Gambar 2.2. Produk Manufaktur Logam-Baja

Sumber: <https://www.researchgate.net/figure/Steelmaking-process-flow-chart/>

Sementara itu produk pemurnian berupa *blooms* dan *billets* dapat diproses dengan hot rolling mill dan menghasilkan (*rods* dan *bar*), baja *section/struktural/beam*. Dan pada ukuran yang kecil dapat dibuat batang baja dan kawat baja (Gojic, M. dan Kozuh, S. 2006).



Gambar 2.3. Pembagian Logam dan Paduan

Sumber: <https://detektif.files.wordpress.com/2008/02/klasifikasi-logam.jpg>

2.2. Logam Non-Besi (*Non-Fero Metals*)

Logam *non-fero* memiliki peran yang luas sebagai logam teknik setelah logam-baja. Logam yang masuk kelompok ini bersifat tidak magnetis, dan yang masuk dalam logam *non-fero* antara lain:

- 1) Aluminium (Al), berat jenis aluminium $2,7 \text{ g/cm}^3$, sepertiga dari berat jenis baja $7,8 \text{ g/cm}^3$. Titik leburnya 660°C , jauh di bawah titik lebur baja yang 1560°C . Bersifat ulet, tahan korosi pada kondisi normal, konduktivitas panas dan listriknya tinggi, mudah dibentuk baik dengan cor, tempa, ekstrusi. Selain itu aluminium tidak beracun. Aluminium diperoleh dari proses pemurnian bouksit. Terdapat jenis aluminium yang tidak dapat diberi laku panas untuk mengeraskannya (*Non-Heat Treatable Aluminium Alloys*) dan ada yang dapat diberi laku panas untuk mengeraskannya (*Heat Treatable Aluminium Alloys*). Aluminium dapat dipadukan dengan silikon (Al-Si) dan termasuk tidak dapat diberi perlakuan panas. Paduan aluminium ini biasa digunakan untuk pembuatan piston dengan cara ditempa, dan dibuat dengan cara cor untuk membuat

peralatan makanan. Paduan aluminium-magnesium (Al-Mg) dibuat untuk logam struktur la, tangki, kawat las, keperluan arsitektur, dll. Paduan antara aluminium dan tembaga (Al-Cu) dimanfaatkan sebagai logam yang dapat dilas dan dapat ditingkatkan kekuatannya dengan diberikan heat treatment.

- 2) Logam Tembaga (Cu), berat jenis tembaga $8,9 \text{ g/cm}^3$, titik lebur hingga 1085°C . Sifat tembaga ulet dan mudah dibentuk dengan rol menjadi lembaran maupun kawat. Konduktivitas listrik dan panasnya sangat bagus, tahan karat dan mudah dimesin. Tembaga diperoleh melalui proses peleburan sulfide. Tembaga dapat dipadu dengan Zinc (Al-Zn) sehingga menjadi kuningan (*brass*). Pemanfaatan Al-Cu adalah sebagai baut, mur dengan ukuran besar, tabung dan plat kondensor, dll. Tembaga juga dapat dipadukan dengan timah (Cu-Sn) sehingga terbentuk perunggu (*bronze*) dan memiliki ketahanan korosi dan aus yang baik, sehingga dimanfaatkan untuk membuat roda gigi cacing, batang ulir cacing, pipa, pegas, membran, dll. Paduan tembaga beryllium (Cu-Be) memiliki sifat tahan aus dan korosi dan digunakan untuk pegas, roll, katup dan beberapa peralatan las.
- 3) Titanium (Ti), Titanium termasuk logam yang ketersediaannya tidak banyak. Titanium diperoleh dari proses peleburan ilmenite (FeTiO_3). Berat jenis hanya $4,5 \text{ g/cm}^3$ dan titik lebur 1668°C . Kelebihan titanium adalah dalam hal kekuatan, keliatan, dan baik dalam mampu tempa dan mesin. Ada beberapa jenis titanium yaitu titanium murni (*α alloys*) yang digunakan untuk logam tahan korosi di pengolahan kimia, titanium paduan rendah (*near α alloys*) yang digunakan untuk komponen gas turbin, titanium paduan beta (*β alloys*) digunakan pada struktur pesawat terbang, paduan alloys dan alloys (*$\alpha + \beta$ alloys*) digunakan pada komponen pesawat terbang.
- 4) Nikel (Ni), logam ini dikenal sangat kuat dan liat, berat jenis $8,9 \text{ g/cm}^3$ dan memiliki titik lebur 1455°C . Nikel sangat penting sebagai bahan pemuat untuk meningkatkan ketahanan korosi. Nikel dikenal sebagai superalloy (*Nickel-base superalloys*). Nickel digunakan pada logam yang bekerja pada tekanan dan temperatur tinggi serta rentan korosi seperti tabung pembangkit uap. Nikel juga digunakan untuk komponen mesin jet.
- 5) Magnesium (Mg), logam ini dikenal ringan karena berat jenisnya hanya $1,74 \text{ g/cm}^3$. Titik leburnya hanya 650°C . Magnesium dikerjakan dalam keadaan panas dengan die-casting. Sifatnya baik dalam kekuatan, kekakuan dan dimensi yang stabil. Magnesium diperoleh dari proses elektrokimia untuk memisahkan magnesium klorida (MgCl_2) menjadi magnesium berbentuk logam dan gas klorida. Magnesium dapat dipadu dengan

aluminium tuang untuk meningkatkan ketahanan korosi kekuatan dan mampu tuang. Magnesium juga dapat dipadukan dengan seng untuk meningkatkan kekuatan. Apabila ketiganya dipadu (Mg-Al-Zn) maka akan memperoleh paduan ringan, kuat dan tahan korosi.

Selain dari beberapa logam non-fero yang telah disebutkan, sebenarnya masih banyak sekali logam non-fero yang biasa dipadukan untuk membuat logam teknik dengan sifat-sifat tertentu, seperti:

- 1) Niobium (Nb), logam ini memiliki kelebihan tahan korosi, titik lebur hingga 2468°C menjadikan logam ini cukup tahan panas. Aplikasinya pada untuk komponen pesawat luar angkasa, komponen nuklir, dan moncong rudal.
- 2) Tantalum (Ta), logam mahal ini termasuk logam berat karena memiliki berat jenis 16,6 g/cm³. Titik leburnya hingga 2996°C. Sifat utamanya adalah ulet, tangguh dan tahan panas tahan korosi. Karena sifatnya itu tantalum digunakan untuk filamen bola lampu, komponen telepon genggam, alat bedah kedokteran, dan komponen pesawat terbang.
- 3) Molibdenum (Mo), Berat jenis logam ini 10,2 g/cm³ dan titik leburnya 2621°C, tidak dapat diberi perlakuan panas. Molibdenum banyak dipadukan dengan logam (Fe) untuk memperbaiki sifat mampu keras, mampu bentuk, ketahanan korosi dan kekuatan tariknya. Aplikasi molibdenum yang lain adalah untuk elemen pemanas dapur listrik, industri kimia, kaca, nuklir dan aerospace.
- 4) Tungsten (W), logam yang juga disebut sebagai wolfram ini memiliki berat jenis 19,6 g/cm³ dan titik lebur 3410°C. Tungsten diperoleh dari bijih wolframite. Aplikasi paduan logam ini adalah pada alat-alat potong, alat elektronik dan kelistrikan dan pengukur temperatur seperti thermokopel.

Pada logam teknik dengan aplikasi tertentu digunakan logam mulia seperti:

- a. Emas, logam mulia ini memiliki berat jenis logam ini 19,3 g/cm³ dan titik leburnya 1064°C. Emas memiliki kemampuan menahan radiasi infra merah, sebagai penghantar panas dan listrik yang baik. Emas dapat dipadu dengan nikel atau paladium sehingga menjadi emas putih. Bila emas dipadu dengan logam maka akan menghasilkan emas biru, dan jika emas dipadu dengan aluminium maka akan menghasilkan emas ungu. Emas digunakan sebagai alat pembayaran dan perhiasan. Emas juga diaplikasikan sebagai pelapis sampel yang akan diuji dengan scanning electron microscope (SEM), terutama logam nonkonduktif. Emas juga digunakan dalam kedokteran.

- b. Perak, logam lunak ini memiliki konduktivitas panas dan listrik tertinggi di antara jenis logam yang lain. Namun karena harganya yang mahal, maka tembaga lebih banyak dipakai sebagai penghantar listrik seperti kabel. Berat jenis logam ini $10,7 \text{ g/cm}^3$ dan titik leburnya 964°C . Selain aplikasi utama sebagai bahan perhiasan, perak diaplikasikan pada dunia kedokteran untuk bahan penambal gigi, komponen komputer, dan elektronik.
- c. Platina, Logam ini memiliki konduktivitas listrik rendah, dan ulet. Berat jenis logam ini $21,45 \text{ g/cm}^3$ dan titik leburnya 1754°C . Aplikasi logam ini untuk perhiasan dan komponen-komponen arloji mewah.

2.3. Logam Tuang (Cast Iron)

Logam tuang (*Cast Iron*) memiliki sifat sulit ditempa namun mudah dituang, sangat keras namun getas. Titik lebur logam tuang berkisar antara $1135^\circ\text{-}1150^\circ\text{C}$. Dalam logam tuang terdapat unsur C, Si dan P yang turut mempengaruhi titik leburnya, terutama Si. Ada beberapa jenis logam tuang yang pembedaannya didasarkan pada warna pada bidang pecahan dan jenis strukturnya.

Beberapa jenis logam tuang antara lain:

- 1) Logam tuang kelabu (*grey cast iron*), jenis logam tuang ini bersifat kuat, dan getas, tahan panas, korosi dan aus, mampu meredam getaran (*damping capacity*) yang baik, koefisien muai panas rendah, memiliki (*machinability*) yang baik, murah dan mudah dalam pembuatannya. Dalam logam tuang kelabu mengandung grafit berbentuk lamel (serpilh), namun ada juga yang berbentuk bola. Aplikasinya untuk komponen kendaraan bermotor, pagar rumah, dll.
- 2) Logam Tuang Ulet/Nodular (*Ductile Cast Iron*), jenis ini memiliki kekuatan dan keuletan relatif tinggi, tahan panas dan korosi. Bentuk grafitnya bulat yang terbentuk karena penambahan unsur Mg atau Ce. Grafit bulat lebih ulet dibandingkan grafit lamel (serpilh). Aplikasi logam tuang ini untuk konstruksi teknik sipil, rol penggiling, pipa, cetakan.
- 3) Logam Tuang Putih (*White Cast Iron*), di dalam logam tuang putih terkandung Mn tinggi, tidak terbentuk grafit karena proses pengikatan zat arang secara kimiawi. Kadar Si di dalamnya kurang dari 0,1%. Struktur yang dominan berupa karbida (Fe_3C) sehingga karakteristiknya sangat keras, tahan aus, tetapi *machinability*nya kurang baik karena rapuh. Aplikasinya kurang banyak, di antaranya untuk *roller* pada mesin pengerolan.
- 4) Logam Tuang Paduan (*Alloyed Cast Iron*), Pada logam tuang jenis ini terdapat unsur pepadu yang tinggi seperti Cr dan/atau Ni, logam tuang ini diaplikasikan pada kondisi

lingkungan korosif dan/atau temperatur tinggi. Pada strukturnya terdapat grafit untuk meningkatkan mampu redam getaran dan machining.

- 5) Logam Tuang Malleable (*Malleable Cast Iron*), jenis ini dikenal sbagai logam tuang mampu tempa. Jenis ini diperoleh dengan memanaskan kembali logam tuang putih pada temperatur 800°-900°C dalam waktu lama sehingga terbentuk logam (Fe) dan karbon (C) dari sementit (Fe_3C) yang ada. Sifat logam tuang ini cukup tangguh dan diaplikasikan sebagai batang penghubung, valve, pemyambung pipa, roda gigi transmisi, dll.

2.4. Baja (Steel)

Baja adalah produk dari paduan logam selain logam tuang. Penggunaanya cukup luas, dari keperluan industri manufaktur, kontruksi, teknik sipil, hingga permesinan. Kandungan karbon pada baja di bawah logam tuang, yaitu antara 0-1,8% saja. Jenis baja cukup banyak dengan berbagai varian kekuatan, kekerasan, keuletan, kemampukerasan, mampu las, mampu bentuk, mampu tempa, ketahanan korosi dan aus yang semuanya dipengaruhi oleh cara pembuatan, kadar komposisi kimia, unsur pemadu, dan treatment yang diberikan.

- a) Berdasarkan kadar karbon, maka terdapat tiga jenis, yaitu baja *low carbon*, *medium* dan *high carbon*. Baja Karbon Rendah/*Low Carbon*. Baja ini memiliki kadar karbon tidak lebih dari 0.25% atau disebut baja *hypo-eutectoyd*, Sifat baja ini lunak, tidak kuat, ulet dan tangguh, sulit diberi perlakuan panas. Kekuatannya dapat ditingkatkan dengan pengerjaan dingin. Struktur mikro berupa ferrite dan pearlite. Baja *low carbon* ini diaplikasikan untuk kaleng minuman, lembaran baja untuk pipa, jembatan, bangunan, baja struktur (profil I, kanal, baja sudut) dan untuk pembuatan sebagian komponen mobil. Sebagian baja rendah karbon dapat ditingkatkan kekuatannya dengan menambahkan unsur Co, V, Ni dan Mo sehingga membuatnya lebih mudah dibentuk, dimesin dan kekuatannya bisa ditingkatkan dengan perlakuan panas. Contoh baja jenis ini adalah baja *high strenght low alloy* (HSLA). Baja Karbon Sedang / *Medium Carbon*. Kadar karbon baja medium berkisar antara 0.25-0.60% C. Sifat baja ini keras, ulet dan kuat, karena umumnya diaplikasikan setelah disepuh dan ditemper sehingga struktur mikro yang dimiliki berupa martensit temper. Unsur paduan yang ditambahkan antara lain Cr, V, dan Mo yang membentuk karbida. Aplikasi baja ini kebanyakan untuk roda kereta api, roda gigi, poros engkol, dll. Baja Karbon Tinggi memiliki kadar karbon berkisar antara 0.6-1,4 % C. Sifat baja ini paling keras, kuat, tahan aus namun rapuh/tidak ulet. Struktur mikro berupa pearlit terdapat sementit (Fe_3C). Unsur paduan yang ditambahkan biasanya Cr, V, T, W dan Mo. Baja karbon tinggi digunakan untuk cetakan, pisau, gergaji, pegas, bantalan, dan *die*.

- b) Berdasarkan total paduan, maka ada dua jenis yaitu paduan rendah dan tinggi. Disebut baja paduan rendah karena total unsur pemuatan yang dimiliki $\leq 8\%$. Dengan merekayasa prosentase paduan seperti nikel, silikon, aluminium, and mangan akan memudahkan dalam merekayasa sifat-sifat baja. Baja jenis ini sangat sesuai untuk komponen mesin semisal baut, poros, dan roda gigi. Selain itu, baja ini juga digunakan untuk logam boiler dan bejana tekan (*pressure vessels*). Baja paduan tinggi memiliki total pemuatan $> 8\%$. Yang termasuk dalam kelompok ini antara lain baja tahan aus (*wear resistant steel*), baja tahan panas (*heat resistant steel*), dan baja tahan korosi (*stainless steel*). Untuk baja stainless paduan unsur krom (Cr) paling sedikit 11% dan biasanya ditambahkan unsur Ni dan Mo. Berdasarkan fasa struktur mikronya baja stainless ini masih dibagi lagi dalam berbagai tipe yaitu: tipe austenit seperti 304, 321, 347, 316 dan 317 dengan aplikasi yang luas dari peralatan makanan dan minuman hingga komponen permesinan, dan arsitektur, dll. Tipe feritik seperti tipe 430 banyak digunakan untuk peralatan pengolahan dan penyimpanan makanan, pipa penukar panas (*heat exchanger tube*), automotive trim, dll. Tipe martensit banyak digunakan untuk katup, baut, mur, ulir, *turbin buckets*, pisau operasi, gunting, dll. Contoh tipe 410, 416 dan 431. Tipe duplex, seperti UNS S31803, UNS S32750, UNS S32750 merupakan baja stainless dengan fasa feritik dan austenit sekaligus. Kadar Cr hingga 20% dan melalui heat treatment sehingga strukturnya lebih halus. Aplikasinya adalah untuk alat-alat pengolahan minyak, gas, pipa *heat exchanger*, petrokimia dan kimia. Tipe PH (*precipitation hardening*), yaitu baja stainless yang didesain memiliki ketangguhan, kekuatan tinggi serta ketahanan korosi normal melalui perlakuan panas. Contohnya untuk valve dan komponen pesawat terbang.
- c) Baja Tahan Panas (*Heat Resistant Steel*), jenis baja ini didesain untuk komponen yang bersinggungan dengan panas tinggi. Jenis baja ini juga banyak menggunakan stainless steel tipe austenit.
- d) Baja Tahan Aus (*Wear Resistant Steel*) atau Baja khusus perkakas / pahat potong dan cetakan logam. Dan yang termasuk baja ini antara lain *high speed tool steels*, *shock resisting tool steels*, *hot work tool steels*, *low carbon mold steels*, *cold work tool steels*, dan *special purpose tool steels*.
- e) Baja Super Paduan (*Iron Base Superalloys*), untuk baja-baja paduan super biasanya memiliki penamaan tersendiri berdasarkan pada trademarnya masing-masing.

2.5. Standarisasi Logam

Standarisasi logam dalam industri sangat penting karena erat kaitannya dengan masalah kegagalan, maintenance, kemudahan identifikasi dan pemesanan dan agar diterima di pasaran karena karakteristiknya yang jelas. Ada beberapa standarisasi di berbagai negara yang berisikan kode, spesifikasi dan jenis perlakuan dalam proses produksi dan jenis produk. Standarisasi tersebut antara lain: *Unified Numbering System (UNS)*, *Society of Automotive Engineers (SAE)*, *British standard (BS)*, *American Iron and Steel Institute (AISI)*, *Japanese Industrial standard (JIS)*, *Alloy Casting Institute (ACI)*, *Aluminum Association (AA)*, *American Petroleum Institute (API)*, *American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, *Deutsches Institut für Normung / German Institute for Standardization (DIN)*, *European Standard (EN)*, *Association Française de Normalization (AFNOR)*, *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, dan Standar Nasional Indonesia (SNI). Setiap standard memiliki pengkodean tersendiri. Dengan adanya pengkodean tersebut akan memudahkan dalam mencari komposisi logam.

Standarisasi SAE dan AISI untuk baja terdiri dari empat angka. Angka pertama menunjukkan paduan utama, angka kedua menunjukkan paduan kedua, sementara angka ketiga dan keempat menunjukkan prosentase karbon. Misalkan baja 1050 menunjukkan bahwa baja tersebut adalah karbon biasa tanpa penambahan sulfur, dengan kadar C 0,50%. Misalkan baja dengan kode 11XX menunjukkan bahwa baja tersebut adalah baja karbon dengan penambahan sulfur.

C. Latihan Soal

Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut dibawah ini untuk *me-review* kedalaman pemahaman Anda tentang materi pada BAB II!

1. Sebutkan perbedaan logam fero dan logam non fero!
2. Berikan contoh logam yang masuk kelompok logam fero dan logam yang masuk kelompok non-fero!
3. Sebutkan jenis-jenis logam tuang yang Anda ketahui!
4. Sebutkan jenis-jenis baja berdasarkan kadar karbonnya!
5. Paduan logam apa yang dapat meningkatkan kekuatan dan ketangguhan baja?
6. Berapa prosentase minimal agar baja masuk pada golongan baja tahan karat/stainless steels?
7. Sebutkan jenis-jenis stainless steels bersama pemanfaatannya!

8. Sebutkan jenis-jenis logam mulia yang digunakan!
9. Sebutkan jenis-jenis standarisasi baja yang Anda ketahui!
10. Jelaskan perbedaan antara *carbon steel* dan *alloy steels*!
11. Jelaskan arti kode baja AISI-SAE 1005, 1045, 1010, dan 1060!
12. Jelaskan arti kode pada alumunium 356.0 dan 5182!

BAB III

SIFAT-SIFAT LOGAM

(*PROPERTIES OF METALS*)

A. Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan materi ini, maka mahasiswa/i diharapkan dapat mengenal, memahami dan menjelaskan tentang sifat-sifat logam (*metals properties*) beserta cara pengujiannya.

B. Penyajian Materi

3.1. Sifat-sifat Logam (*Mechanical Properties of Metals*)

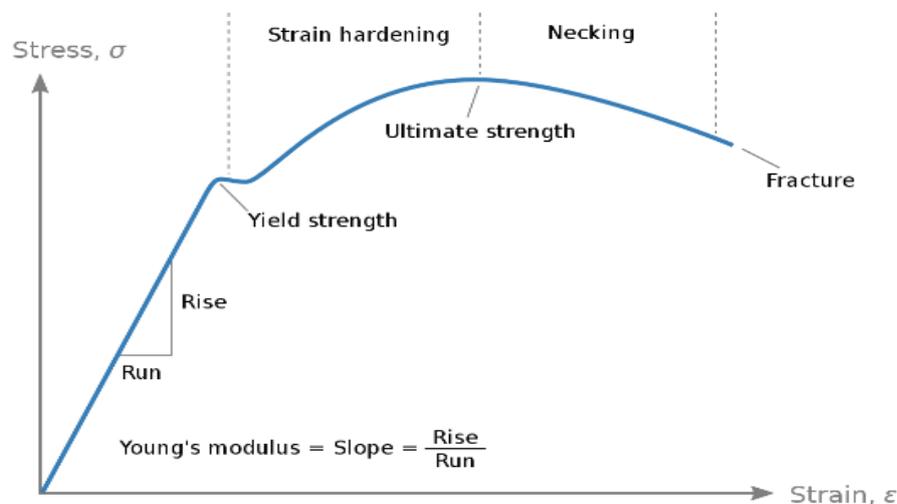
Sifat-sifat mekanik logam (*mechanical properties of metals*) adalah kemampuan suatu logam dalam mempertahankan kondisinya dari deformasi akibat beberapa beban kerja, baik beban dinamis, beban kejut, gaya yang bekerja pada pada temperatur tinggi, creep, dll. Sifat logam tersebut dapat dijabarkan meliputi kekuatan tarik (*tensile strenght*), kekuatan geser, kekerasan (*hardness*), ketahanan aus, kerapuhan (*brittle*), keuletan (*ductility*), ketahanan lengkung, puntiran, dll. Untuk itu logam sangat penting diketahui sifatnya ketika masih berupa bahan agar memudahkan dalam menentukan pemilihan proses, menentukan parameter proses dan menyimpulkan bahan baku yang sesuai. Sifat logam juga harus dipahami ketika logam telah dalam proses pengerjaan, maupun setelah menjadi produk agar memenuhi spesifikasi yang sesuai. Pihak yang sangat berkepentingan dalam hal ini adalah produsen dan pengguna. Dengan mengetahui sifat logam melalui beberapa pengujian, maka mereka dapat mengetahui kualitas produk, ferifikasi sesuai dengan spesifikasi, memahami karakteristik logam, mengamati kondisi terakhir, mencari penyebab kerusakan, menghitung umur sisa, untuk mendapatkan sertifikasi, dll. Melalui pengujian dapat diketahui kondisi logam seperti adanya retak, rongga, diskontinuitas, serta penipisan yang berkaitan dengan korosi, deformasi dan kebocoran.

Terdapat dua jenis pengujian terhadap logam, yaitu pengujian merusak (*Destructive Test / DT*), dan pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Test / NDT*). Yang termasuk pengujian tidak merusak adalah: *dye penetrant, magnetic particle, radiografi, ultrasonic, eddy current, wall thickness, surface roughness, insitu hardness*, komposisi kimia. Pengujian yang merusak antara lain adalah: *metalografi, tensile test, bending test, uji tekan, shear test, uji impact, uji kekerasan, hardenability, uji puntir, fatigue, corrosion, scratch test, wear test, creep, bonding test, SEM (scanning electron microscopy), TEM (Transmission Electron Microscopy)*. Dan

ada jenis pengujian yang merusak namun juga bisa tidak merusak, antara lain: yaitu *metallography*, xrd, dan strain gauge. Pelaksanaan pengujian dapat dilakukan di laboratorium, namun dalam kondisi tertentu dapat dilakukan di lokasi (*in situ*). Dalam pertemuan kali ini akan dibahas beberapa jenis pengujian yang merusak (DT), antara lain:

3.2. Uji Tarik Logam (*Tensile Test of Metals*)

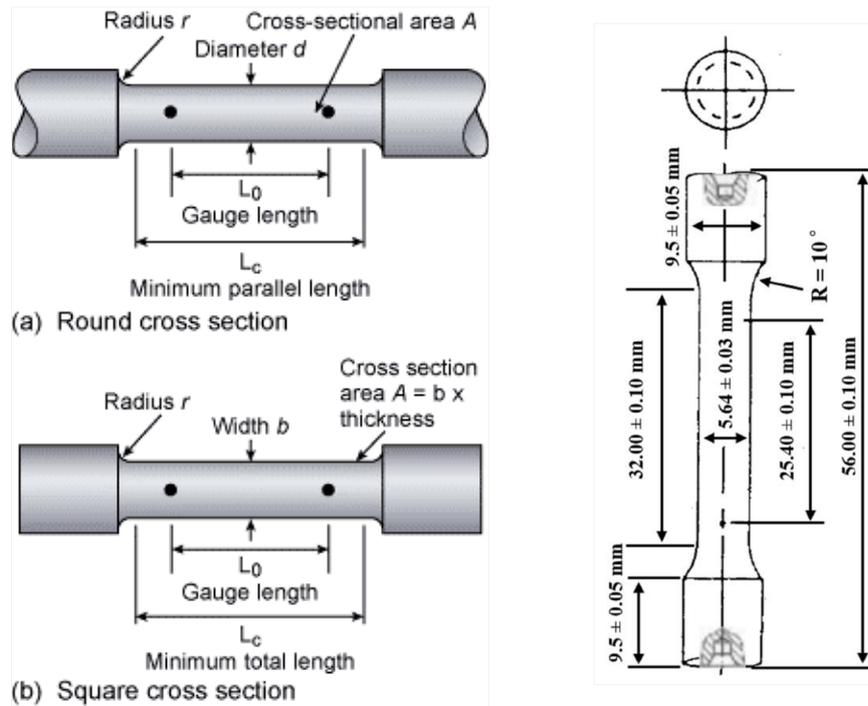
Kekuatan tarik logam (*tensile test of metals*) suatu logam didefinisikan sebagai kemampuan logam untuk menahan beban tarik statis dalam satuan luas tertentu. Kekuatan tarik diketahui melalui pengujian tarik dengan membuat benda uji dari logam yang diuji, namun apabila tidak memungkinkan dapat dilakukan dengan skala penuh, itupun jika alat uji memungkinkan. Melalui uji tarik maka akan diketahui karakteristik mekanik akibat pembebanan tarik statis, yaitu *tensile strength*, *yield strength*, *ductility*, *toughness*, *elastic limit*, *breaking strength*, *elastic modulus*, *fracture type*, *stress/strain curve*.



Gambar 3.1. Kurva Tegangan dan Regangan Logam

Sumber: https://en.wikipedia.org/wiki/Stress%E2%80%93strain_curve

Pada pengujian tarik, ketika beban tarik bekerja, maka logam akan mengalir searah sumbu pembebanan, sehingga seluruh batang mengalami deformasi. Namun karena kedua ujung benda uji dijepit pada pencekam mesin tarik, maka perubahan bentuk pada daerah tersebut tidak sempurna dan hasil deformasi agak susah diamati. Untuk itu perlu dilakukan alokasi daerah deformasi dengan membuat *gauge length* dengan harapan bahwa deformasi dominan terjadi pada daerah tersebut hingga patah.



Gambar 3.2. Model Spesimen Uji Tarik Logam

Sumber: <https://www.researchgate.net/figure/Schematic-sketch-of-the-standard-tensile-test-sample>

Dimensi benda uji dalam tensile test cukup beragam menurut bentuk dan jenis logam yang diuji.

- Benda uji standar menurut JIS Z 2201 untuk *plate* $W = 40$ mm; $L = 200$ mm; $P = 220$ mm; $R = 25$ min; $T =$ sesuai tebal aslinya.
- Benda uji standar menurut JIS Z 2201 untuk *bars* $D =$ sesuai ukuran logam, $L = 4$, $P = L + 2D$.
- Benda uji standar menurut JIS Z 2201 untuk *sheet* $W = 25$ mm; $L = 50$ mm; $P = 60$ mm; $R = 15$ min $T =$ sesuai tebal aslinya.
- Benda uji standar menurut JIS Z 2201 untuk *plate* $W = T$ mm; $L = 4'A$ mm; $P = 1,2L$ mm; $R = 15$ min; $T =$ sesuai tebal aslinya.

Untuk itu dalam industri telah buat beberapa standar uji dalam pengujian tarik. Dan berikut adalah standar pengujian tarik yang dipakai untuk beberapa logam:

Mesin uji tarik yang digunakan disesuaikan dengan jenis logam uji serta dimensinya.



Gambar 3.3. Mesin Uji Tarik Logam
Sumber: <https://www.worldoftest.com/universal>

Melalui pengujian tarik akan diperoleh kurva pengujian tarik yang menjelaskan perubahan kondisi logam yang diuji selama mengalami beban tarik. Hal utama yang perlu diperhatikan adalah kemampuan maksimum logam dalam menahan beban. Kemampuan ini disebut “*Ultimate Tensile Strength (UTS)*”/ tegangan tarik maksimum. Dalam hal ini ada keterkaitan dengan Hukum Hooke. Hampir setiap logam, pada tahap sangat awal dari uji tarik, hubungan antara beban / gaya yang diberikan berbanding lurus dengan perubahan panjang bahan tersebut. Ini disebut daerah linier atau *linear zone*. Di daerah ini, kurva pertambahan panjang vs beban berdasar hukum Hooke, *rasio tegangan (stress) dan regangan (strain) adalah konstan*

Tegangan tarik (σ) dalam kurva tegangan-regangan dapat didefinisikan dalam rumus:

$$\sigma = F / A \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

dimana:

σ = tegangan tarik [N/mm²]

F = gaya tarik [N]

A = luas penampang [mm²]

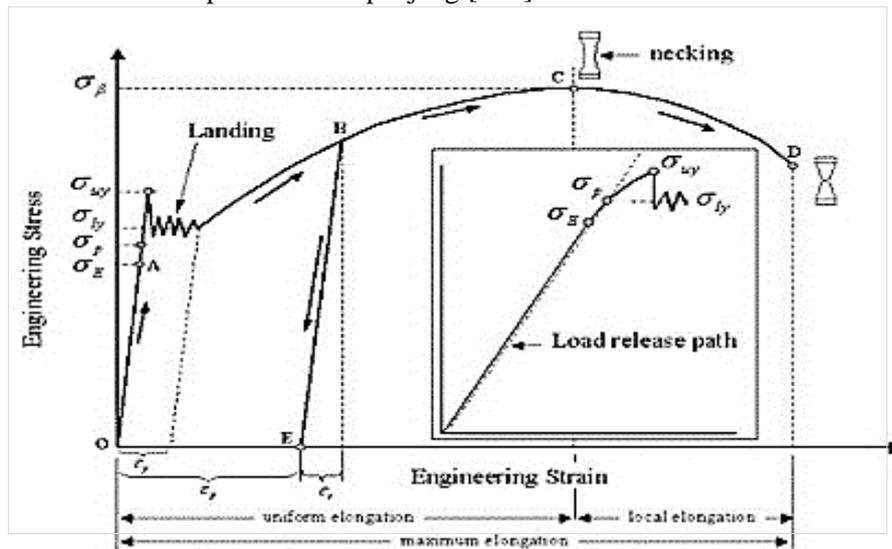
Sedangkan nilai regangan dapat dicari dengan rumus:

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 = (L_i - L_0 / L_0) \times 100 \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

ε = regangan [%]

L_i = panjang setelah penarikan [mm]

L_0 = panjang awal [mm]
 ΔL = selisih pertambahan panjang [mm]



Gambar 3.4. Kurva uji tarik Logam

Sumber: <https://fdokumen.com/document/mengenal-uji-tarik-dan-sifat-sifatmekanik-logam.html>

- Daerah elastis (O-A) adalah daerah pembebanan dimana logam masih bersifat elastis, artinya logam berdeformasi ketika dibebani (σ_E) dan kembali ke bentuk dan dimensi awal ketika beban dilepas, dan kurvanya berbentuk garis lurus. Namun jika beban ditarik hingga melampaui titik A, *Hooke's Law* tidak berlaku lagi dan pada nahan terdapat perubahan permanen. Terdapat konvensi batas regangan permanen (*permanent strain*) sehingga masih disebut perubahan elastis yaitu kurang dari 0.03%, tetapi sebagian referensi menyebutkan 0.005%. Tidak ada standarisasi yang universal mengenai nilai ini.
- Tegangan pada titik P adalah batas proporsional (σ_p), yaitu tegangan tertinggi dimana *Hooke's Law* masih berlaku, yaitu regangan berbanding lurus dengan panjang awal dan beban tertentu.
- Daerah plastis. daerah plastis ialah daerah tegangan dimana logam mengalami perubahan bentuk permanen sebesar ΔL walaupun beban telah dilepas, mulai daerah ini *Hooke's Law* sudah tidak berlaku dan kurva mulai keluar dari garis lurus, dan regangan (ϵ) yang terbentuk disebut regangan plastis.
- Yield point* (σ_y) ialah titik dimana terjadi regangan platis pada pembebanan yang sedikit berfluktuasi atau mendekati konstan. Pada logam *ferro* titik tersebut ditandai dengan terbentuknya daerah bergelombang pada kurva tegangan-regangan. tetapi pada beberapa logam *non-ferro* titik tersebut tidak nampak jelas sehingga diambil asumsi bahwa *yield* terjadi pada regangan 0,1% atau 0,2 % dan tegangan pada titik yield ini disebut tegangan

yield (σ_y atau $\sigma_{0,2}$) dan di beberapa negara seperti Inggris menyebutnya sebagai *proof stress*, besarnya tegangan tersebut ialah P_y/A_0 . Tegangan *yield* ini sangat penting untuk menghitung kekuatan design karena pembebanan pada operasionalnya tidak boleh melebihi titik *yield*.

- e) Tegangan tarik maksimum ($\sigma_{\max} = \sigma_{uy}$) ialah tegangan maksimum logam yang mampu dicapai saat dilakukan pengujian tarik. Besar tegangan tersebut ialah besarnya gaya (P_{\max}) dibagi dengan luas permukaan melintang (A_0). tegangan ini merupakan patokan kekuatan logam, serta menunjukkan tegangan maksimum dari logam yang mampu dipikul saat logam tersebut dirubah bentuk/ berdeformasi tanpa patah/robek. Ada 2 ketentuan yang harus diperhitungkan oleh para *engineers*:
- 1) jika menghitung gaya untuk konstruksi atau system maka *yield stress* tidak boleh dilampaui.
 - 2) Jika menghitung gaya untuk metal forming, maka *yield* dilampaui tapi *max stress* tidak boleh dilampaui.
- f) Tegangan patah (σ_β) ialah tegangan dari logam saat logam tersebut mulai patah akibat pembebanan tarik. Besar σ_β ialah P/A_0 [N/mm^2].
- g) Keliatan (*ductility*). keliatan merupakan sifat logam yang menunjukkan mudah tidaknya logam tersebut berdeformasi tanpa patah atau menunjukkan kemampuan logam untuk mengalir secara plastis tanpa patah ketika dilakukan proses perubahan bentuk. *ductility* ini biasanya ditunjukkan oleh besarnya regangan total (ϵ_b) dari logam yang mampu dicapai sampai logam tersebut patah atau besarnya reduksi luas penampang melintang sampai logam tersebut patah (q). $\epsilon_b = (L_b - L_0)/L_0$, dan $q = (A_0 - A_b)/A_0$.
- h) Modulus elastisitas atau sering juga disebut sebagai Modulus Young (E) adalah suatu nilai yang menunjukkan sifat kekakuan dari logam. makin tinggi nilai modulus elastisitas makin rendah regangan elastis yang dapat dicapai pada beban yang diberikan. modulus elastisitas ini berguna untuk menghitung defleksi dari konstruksi logam seperti beam, dll. Besarnya nilai modulus elastisitas ini dijabarkan dalam rumus $E = \sigma/\epsilon$, modulus elastisitas ini hanya berlaku di daerah elastis dari kurva tegangan - regangan atau di daerah *Hooke's Law*.
- i) Derajat kelentingan (*resilience*), ialah kemampuan dari logam untuk menyerap energi ketika dilakukan deformasi elastis serta melepaskannya ketika beban di bebaskan. nilai ini biasanya diukur dengan *modulus of resilience* (U_r), yaitu energi regangan per unit volume yang dibutuhkan untuk menimbulkan tegangan dari tegangan nol sampai tegangan *yield*. Dari definisi ini menunjukkan bahwa logam yang ideal yang dapat

menahan energi dari beban yang diberikan agar logam tidak mengalami deformasi permanen adalah logam yang mempunyai tegangan *yield* yang tinggi dan mempunyai modulus elastisitas yang rendah. (Misalnya bahan untuk per kendaraan).

- j) Ketangguhan (*toughness*). ketangguhan merupakan kemampuan logam dalam menyerap energi didaerah plastis, atau kemampuan memikul tegangan melebihi tegangan yield tanpa patah. Ketangguhan diperlukan untuk logam yang diaplikasikan pada komponen otomotif seperti coupling, gear, rantai. Cara untuk mengukur nilai ketangguhan adalah dengan menghitung luas daerah dibawah kurva tegangan regangan. Suatu pendekatan matematis disusun untuk menghitung besarnya ketangguhan (UT)

$$UT \sim \{(\sigma_y + \sigma_u) / 2\} \epsilon_b. \dots\dots\dots (3.3)$$

3.3. Uji Tekuk Logam (*Bending Test of Metals*)

Uji tekuk (*bending test*) adalah pengujian yang bertujuan mengetahui kualitas logam secara visual. Pada pengujian ini proses pembebanan dilakukan dengan pendorong/ mandrel yang ukurannya telah didesain untuk memaksa bagian tengah spsimen uji tertekuk diantara dua penyangga yang dipisahkan oleh jarak yang telah ditentukan. Salah satu tujuan pengujian bending ialah untuk mengamati kejadian/ reaksi yang muncul pada saat logam ditekuk yaitu *spring back*.



Gambar 3.5. Pengujian Tekuk Logam
Sumber: https://www.youtube.com/watch?v=_Dl4mbtTCs0

Pada proses bending terdapat *spring back* yang dapat didefinisikan sebagai perubahan dimensi yang terbentuk setelah tekanan pembentuk dihilangkan. Perubahan ini merupakan akibat dari perubahan regangan yang dihasilkan oleh pemulihan elastis (*elastic recovery*). *Elastic recovery* ini lebih besar kalau logam yang bersangkutan mempunyai tegangan *yield*

yang tinggi, modulus elastisitas rendah dan mempunyai regangan plastis yang tinggi dan jika rasio panjang terhadap tebal besar.

Melalui pengujian ini dapat diketahui nilai kekuatan lengkung / kekuatan lentur logam. Kekuatan lengkung dapat diartikan sebagai kemampuan logam dalam menerima beban tekan. Perhitungan nilai tegangan lentur diketahui melalui rumus:

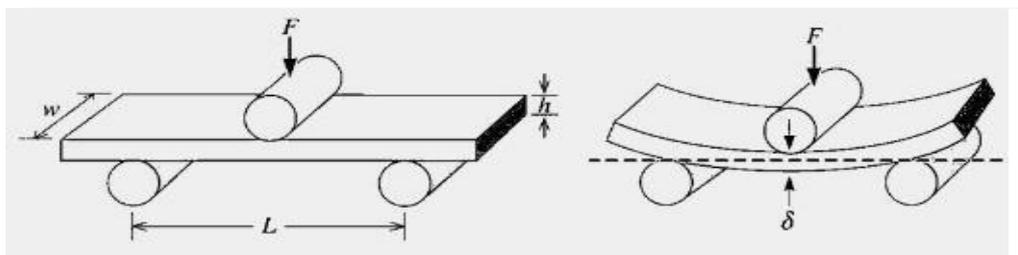
$$\sigma_b = 3FL/2wh^2 \dots\dots\dots (3.4)$$

$$E_b = (L 3F/4wh 3\delta) \dots\dots\dots (3.5)$$

Dimana:

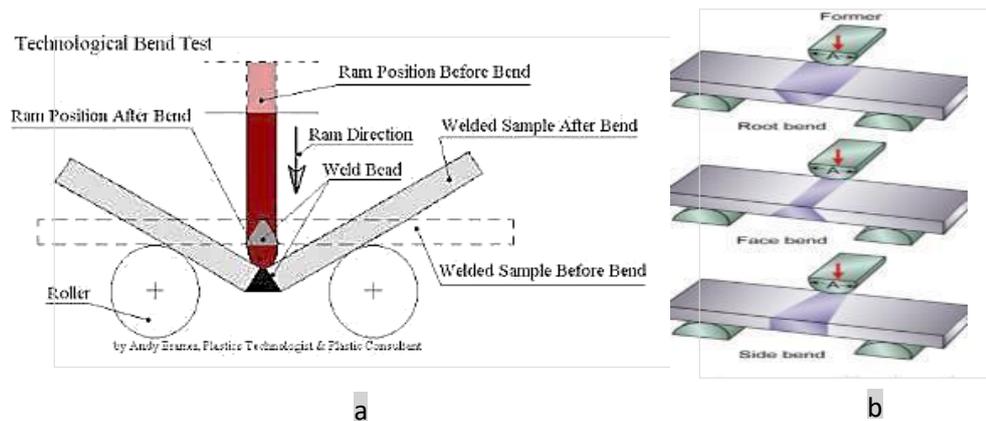
- σ_b = tegangan lentur [N/mm²]
- F = beban patah [N]
- L = panjang jarak tumpuan [mm]
- E_b = Modulus lentur [N mm]
- w = lebar benda uji [mm]
- h = tebal [mm] dan
- δ = difleksi [mm]

Adapun skema pengujian tekuk dapat dilihat pada gambar 3.6, di mana beban diberikan pada tengah logam yang ditumpu pada dua penyangga.



Gambar 3.6. Skema Pengujian Tekuk
Sumber: <https://slideplayer.com/slide/6644864/>

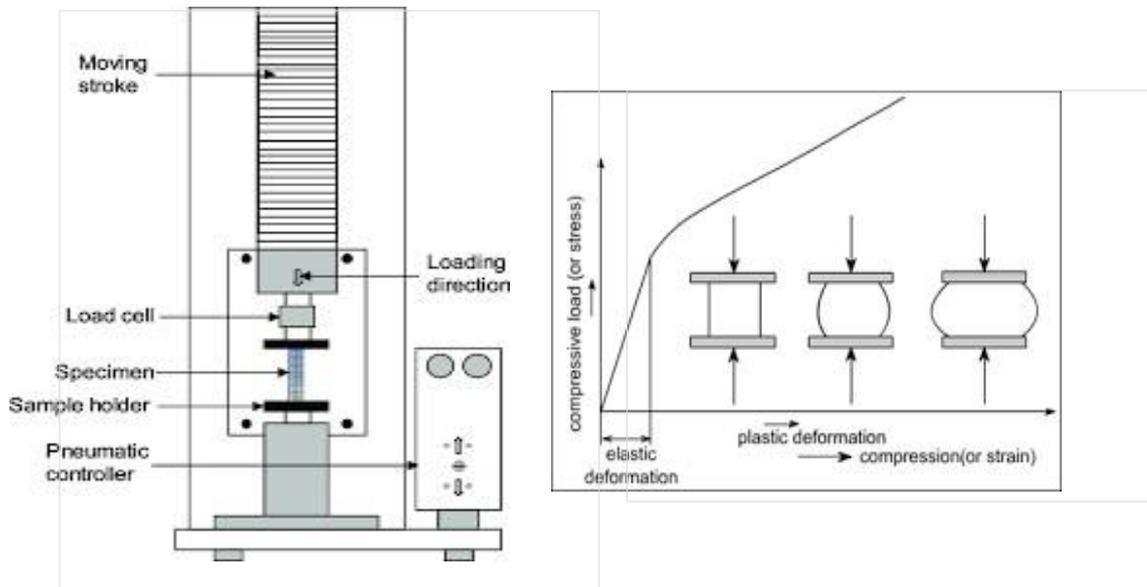
Uji lengkung banyak dimanfaatkan untuk mengetahui kekuatan hasil laslasan. Pada pengujian hasil las dilakukan penekanan pada akar lasan, muka lasan, dan bagian samping lasan seperti tampak pada gambar 3.7b.



Gambar 3.7. Skema Pengujian Tekuk Pada Pengelasan Logam
 Sumber: <http://www.plasticsmag.com/welding.asp?fIssue=Mar/Apr->

3.4. Uji Tekan Logam (*Compression Test of Metals*)

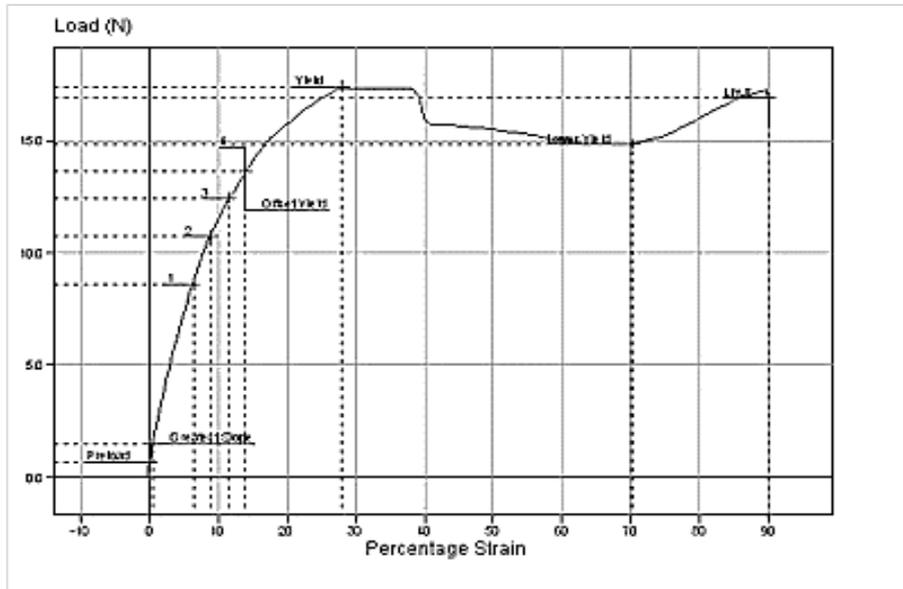
Pengujian tekan termasuk salah satu pengujian merusak yang diperlukan untuk mengukur sifat alir plastis dan batas patah *ductile* dari logam. Jika dilihat dari arah pembebanannya, maka uji tekan merupakan kebalikan dari uji tarik. Uji tekan menghasilkan *compressive yield stress*, *compressive ultimate stress*, dan *compressive modulus of elasticity*.



Gambar 3.8. Skema Mesin Uji Tekan Logam (*Compression Test of Metals*)
 Sumber: <https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-compression-testing-machine>

Pada pengujian ini tidak ada perubahan volume benda uji, namun ketika benda uji ditekan akan menjadikan tinggi benda uji turun/memendek dan diikuti dengan makin besarnya penampang melintang benda uji. Besarnya tegangan pada uji tekan sama dengan sama dengan tegangan pada uji tarik, yaitu beban dibagi dengan luas penampang melintang.

Penetration test digunakan untuk menentukan daya tahan penetrasi dari platis padat. Proses pengujian meliputi sebuah penetrator yang didorong ke benda uji pada kecepatan yang konstan dan pada sudut yang tepat kemudian menekan benda uji. Pengujian dapat dilakukan pada rentang temperatur dari -40°C hingga $+23^{\circ}\text{C}$. Kekuatan tekan dapat diukur dengan $\sigma_c = F/A$ dengan F sebagai gaya tekan, dan A sebagai luas penampang melintang.



Gambar 3.9. Kurva Uji Tekan Logam (*Compression Test of Metals*)
 Sumber: <https://www.ametektest.com/learningzone/testtypes/compressiontesting>

Dari pengujian tekan ini akan dapat diukur:

- Maximum force* [N]
- Deflection at maximum force* [mm]
- Energy to maximum force* [J]
- Puncture deflection* [mm]
- Puncture energy* [J]

Rumus untuk menghitung kekuatan tekan:

$$KT = F / A \dots\dots\dots (3.6)$$

Dimana:

KT = kekuatan tekan [kg/cm²]

F = gaya atau beban yang bekerja pada benda [N]

A = luas penampang awal [cm²]

3.5. Uji Ketangguhan Logam (*Impact Test of Metals*)

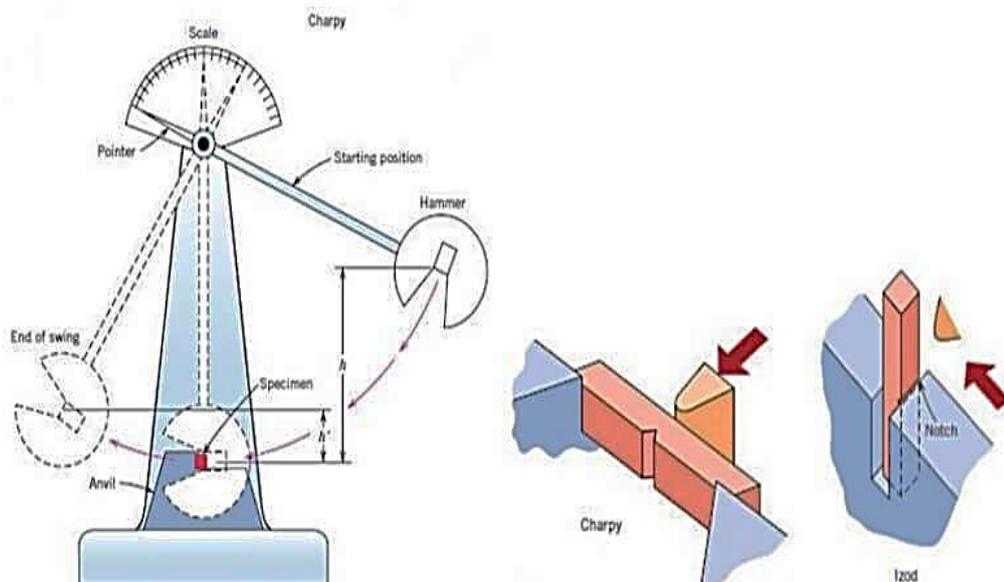
Pengujian ketangguhan logam (*impact test of metals*) termasuk salah satu pengujian merusak (DT) untuk mengetahui ketangguhan (*toughness*), kerapuhan (*brittleness*), keliatan (*ductility*), dan temperatur transisi. Ada bentuk kegagalan logam dijumpai berupa kerusakan pada konstruksi yang menampilkan pola patah getas padahal terbuat dari logam yang ulet. Ada beberapa faktor yang menjadikan suatu logam cenderung mengalami patah getas, hal menyebabkan antara lain tegangan triaxial, temperatur rendah dan laju regangan/pembebanan yang tinggi.

Tegangan triaxial muncul manakala pada permukaan terdapat takikan/notch.

Pengujian ini juga bertujuan untuk mendapatkan:

- Nilai *impact* yang merupakan energi/luas permukaan.
- Ketangguhan yang merupakan besarnya energi yang dapat diserap sampai patah.
- Temperatur transisi yang merupakan batas temperatur antara lunak (*ductile*) dan rapuh (*brittle*).

Terdapat dua jenis pengujian *impact*, yaitu tipe *charpy test* dan tipe *izod test*. Perbedaan keduanya terletak pada posisi spesimen dan letak notch spesimen. Pada tipe *charpy* posisi spesimen mendatar tegak lurus dengan ayunan pendulum, dan letak notch di tengah spesimen. Sementara pada tipe *izod* posisi spesimen berdiri dan searah dengan ayunan pendulum dengan notch terletak tidak di tengah spesimen.



Gambar 3.10. Pengujian *Impact*

Sumber: <https://www.detch.co.id/impact-test/>

Pengujian dilakukan dengan mengayunkan pemukul dengan ketinggian awal (h_0) dan ketinggian akhir (h_1). Dengan demikian diketahui bahwa energi yang dibutuhkan hingga rusakya benda kerja atau spesimen adalah:

$$\Delta E = W \ell (\cos \beta - \cos \alpha) \dots\dots\dots (3.7)$$

$$E_0 = W \cdot h_0$$

$$E_1 = W \cdot h_1$$

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_0 - E_1 \\ &= W (h_0 - h_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_0 &= \ell - \ell \cos \alpha \\ &= \ell (1 - \cos \alpha) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_1 &= \ell - \ell \cos \beta \\ &= \ell (1 - \cos \beta) \end{aligned}$$

dimana:

E_0 = Energi awal (J)

E_1 = Energi akhir (J)

W = Berat bandul (N)

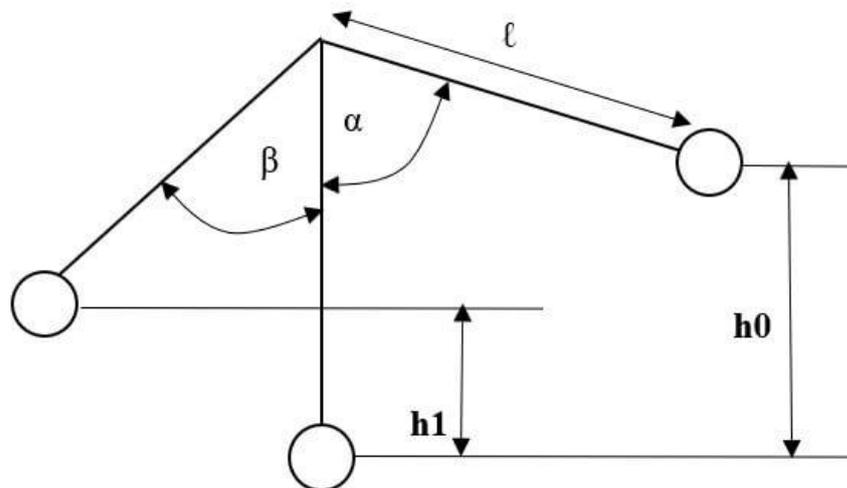
h_0 = Ketinggian bandul sebelum dilepas (m)

h_1 = Ketinggian bandul setelah dilepas (m)

ℓ = Panjang lengan bandul (m)

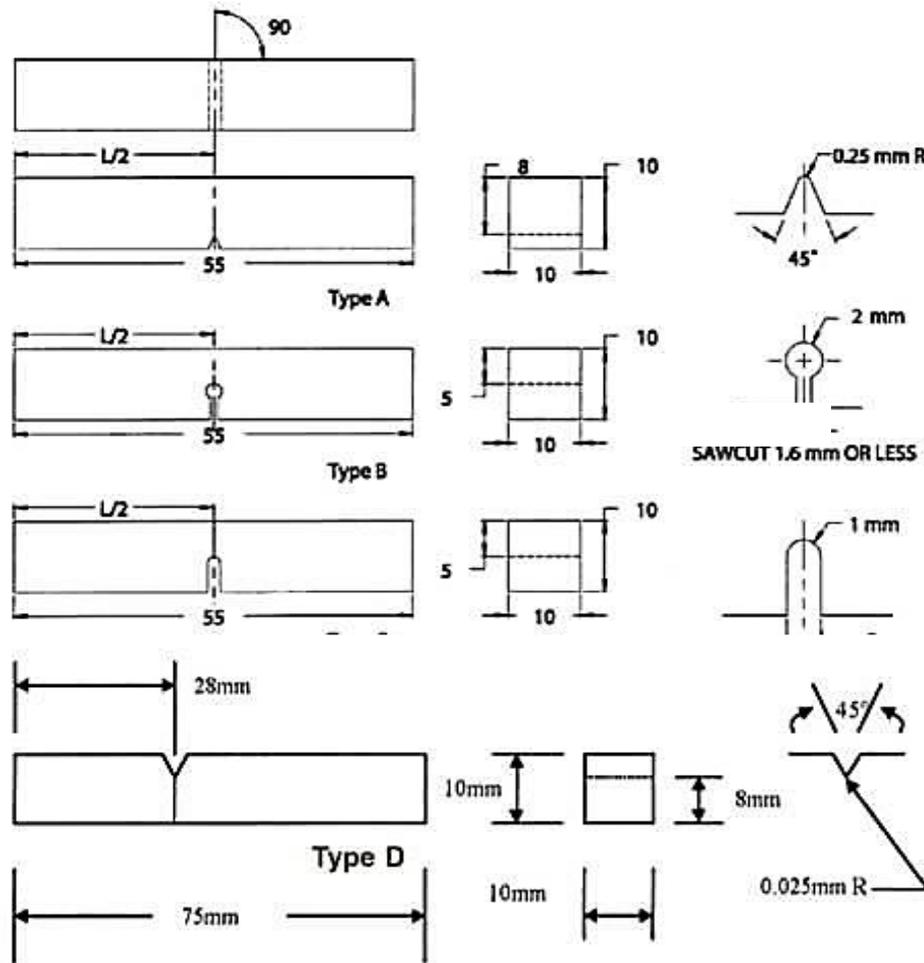
α = Sudut awal ($^\circ$)

β = Sudut akhir ($^\circ$)



Gambar 3.11. Sketsa Perhitungan Energi Impact

Sumber: <https://www.detech.co.id/impact-test/>



Gambar 3.12. Bentuk Spesimen Uji *Impact*

Sumber: <http://hima-tl.ppns.ac.id/impact-test-pengujian-takik/>

Melalui pengujian ini akan diketahui apakah logam tersebut termasuk logam getas ataukah ulet. Selain itu temperatur juga turut mempengaruhi penyerapan energi saat terjadi pukulan pada spesimen.

Pada baja, semakin tinggi kadar karbon, maka akan semakin membentuk baja menjadi keras dan getas, sementara jika kadar karbonnya rendah akan menyebabkan baja lunak dan lebih ulet. Sifat tersebut dapat dilihat dari pengamatan patahan spesimen dengan mikroskop.

3.6. Uji Kekerasan Logam (*Hardness Test of Metals*)

Pengujian merusak (DT) berikutnya adalah uji kekerasan. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan logam terhadap deformasi di permukaannya. Pengujian dilakukan pada logam yang pada aplikasinya bersinggungan dengan gesekan dan keausan. Pengujian dilakukan dengan menggores logam seperti pada metode Mohs Scale atau dengan menekankan indenter ke permukaan logam seperti pada metode Brinell, Vickers dan

Rockwell. Semakin keras logam, maka akan semakin sulit untuk digores atau diindentasi. Pengujian dapat dilakukan di laboratorium dengan mengambil sampel logam atau dilakukan di lokasi (in situ) dengan alat uji kekerasan portabel. Sebelum pengujian, maka perlu dilakukan preparasi yang sama dengan preparasi metallografi, tetapi tanpa poles dan etsa, kecuali micro hardness. Prinsip dasar nilai kekerasan adalah besarnya gaya tekan yang diberikan dibagi luas penampang bekas penekanan. Sebagai gambaran, proses pengujian kekerasan dapat dijelaskan sebagai berikut:

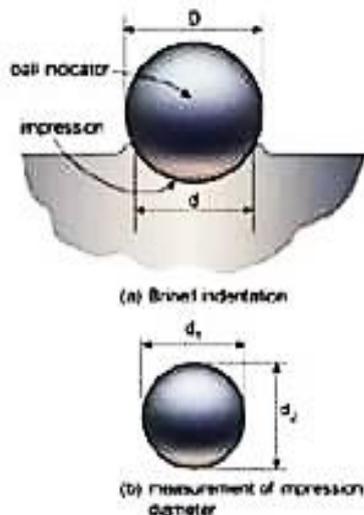
a) Prinsip Metode Brinell

Metode brinell dilakukan dengan menekankan indentor bola baja ke permukaan benda uji dalam waktu 10-15 detik. Diameter indentor bervariasi tergantung beban dan logam uji. Jejak indentasi berupa lingkaran, diameternya diukur, kemudian nilainya dimasukkan ke dalam rumus *Hardness Brinell*.

$$HB = 2P / (\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})) \dots\dots\dots (3.8)$$

dimana:

- HB = nilai kekerasan Brinell
- P = besar gaya tekan (kgf = 9,8N)
- D = diameter indentor (mm)
- d = diameter indentasi (mm)



$$BHN = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$$

Where:

- P is the test load [kg]
- D is the diameter of the ball [mm]
- d is the average impression diameter of indentation [mm]

Gambar 3.13 Uji Kekerasan Metode Brinell

Sumber: <https://www.quora.com/Is-surface-preparation-required-in-the-Brinell-hardness-test>

Metode Brinell lazim digunakan untuk mengukur kekerasan logam dengan nilai kekerasan yang rendah. Pengujian Brinell adalah salah satu cara pengujian kekerasan yang paling banyak digunakan. Pada pengujian brinell digunakan bola baja yang dikeraskan sebagai indenter. Kekerasan Brinell dihitung sebagai berikut:

$$BHN = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots\dots\dots (3.9)$$

- BHN = Luas tampak tekan
- P = gaya tekan (kg)
- D = diameter bola indenter [mm]
- d = diameter tampak tekan [mm]



Gambar 3.14. Alat Uji Metode Brinell

Sumber: <https://www.google.ru/search?q=gambar+alat+uji+brinell&newwindow>

b) Prinsip Metode Vickers

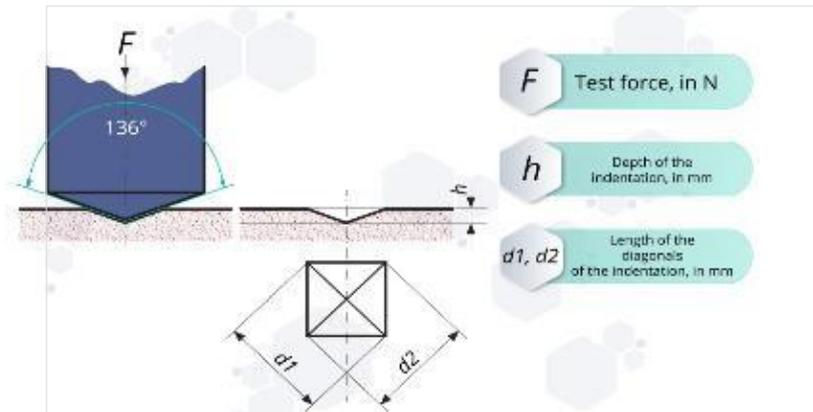
Metode vickers dilakukan dengan menekan indenter berupa limas diamond dengan sudut puncak 136°. Besar indentornya bervariasi tapi sudutnya sama. Jejak indentasi berupa bujur sangkar, kemudian panjang kedua diagonalnya diukur, dan dimasukkan ke dalam rumus Hardness Vickers.

$$HV = 1,854 P/d^2 \dots\dots\dots (3.10)$$

dimana:

- HV = nilai kekerasan vickers
- P = besar gaya penekanan (kgf = 9,8 N)
- d = diameter diagonal (mm)

Metode ini biasa digunakan pada pengukuran kekerasan logam dengan kekerasan rendah hingga tinggi dengan dimensi spesimen yang kecil.



Gambar 3.15. Uji Kekerasan Metode Vickers

Sumber: <https://matmatch.com/learn/process/hardness-comparison>

Indentor yang digunakan dalam metode uji Vickers adalah piramida berlian dengan alas persegi, yang sisi-sisinya bertemu di puncak pada sudut $\alpha = 136^\circ$. Ini diterapkan pada spesimen dengan kekuatan uji (dengan standar mulai dari 10 g) dan ditahan sesuai dengan waktu penahanan. Panjang kedua diagonal lekukan uji sisa diukur secara optik. Kekerasan Vickers kemudian dihitung dari rata-rata diagonal dan gaya uji yang diterapkan.



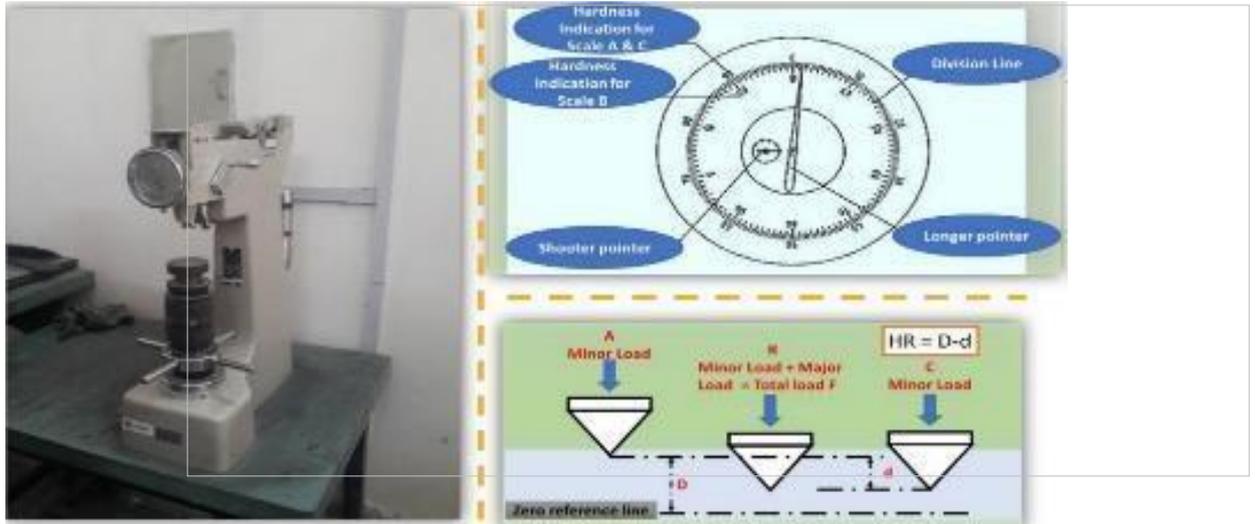
Gambar 3.16. Alat Uji Metode Vickers

Sumber: <https://www.zwickroell.com/id/industri/logam/standar-logam/uji-vickers-iso-6507/>

c) Prinsip Metode Rockwell

Metode rockwell dilakukan dengan menekan indenter berupa kerucut diamond dengan sudut puncak 120° atau bola baja. Pembebanan dilakukan secara bertahap. Pembebanan minor load 10 kg, sedangkan beban mayor 60, 100, dan 250 kgf. Jejak

penekanan dapat dihitung kedalamannya dan langsung diamati di skala penunjukan. Kekurangan metode rockwell adalah hasil pengukuran yang kurang teliti.

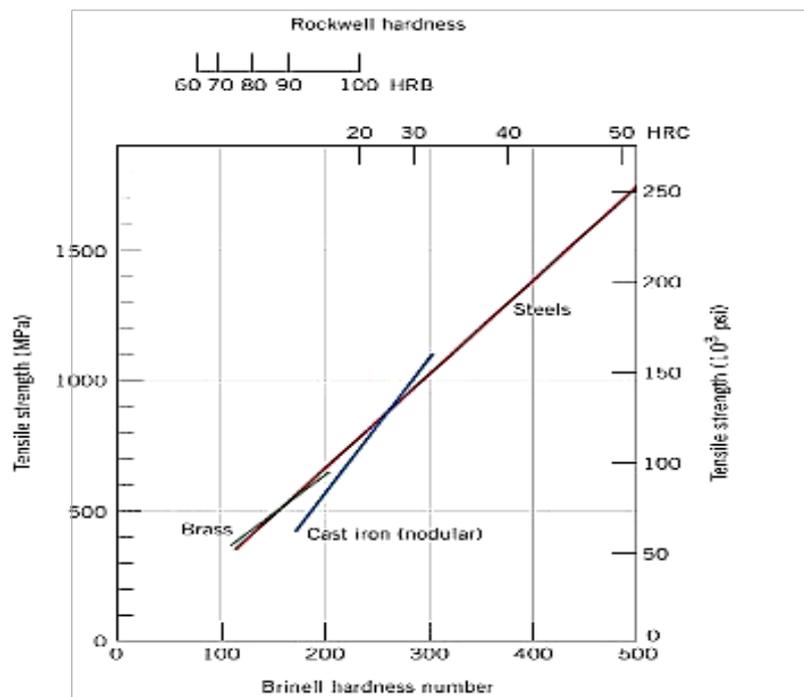


Gambar 3.17. Uji Kekerasan Metode Rockwell

Sumber: <https://logams-today.com/rockwell-hardness-test/>

Ada beberapa jenis skala indenter yang digunakan dalam metode Rockwell untuk setiap jenis logam berbeda.

Melalui pengujian kekerasan dapat diketahui nilai kekuatan tarik logam. Korelasi keduanya dapat dilihat dalam gambar 3.18.



Gambar 3.18. Hubungan Kekerasan dan Kekuatan Tarik Logam

Sumber: <http://teknikmesinmanufaktur.blogspot.com/2018/05/>

Pengujian kekerasan (hardness test) adalah suatu proses yang bertujuan untuk mengetahui ketahanan suatu material terhadap deformasi pada daerah lokal atau permukaan material, khusus untuk logam deformasi yang di maksud adalah deformasi plastis. Deformasi plastis sendiri adalah suatu keadaan dari material yang ketika diberikan gaya maka struktur mikronya tidak akan kembali ke bentuk semula.

Terdapat berbagai macam uji kekerasan lekukan, antara lain uji kekerasan Brinell, Vickers, Rockwell, Knoop, dan lain sebagainya. Dapat dilihat pada gambar 3.17. dibawah ini.

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	{ <ul style="list-style-type: none"> Diamond cone $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$ in. diameter steel spheres 	 	 	60 kg } 100 kg } 150 kg } 15 kg } 30 kg } 45 kg }	} } } } } }

Gambar 3.19. Berbagai Bentuk Pengujian Kekerasan Logam (*Hardness Test of Metals*)
 Sumber: <https://www.google.ru/search?q=gambarpengujiankekerasanhardnesstest/>

3.7. Uji Metalografi Logam (*Metallography Test of Metals*)

Uji metalografi logam (*metallography test of metals*) termasuk pengujian yang sangat sering dilakukan di laboratorium. Pengujian ini dilakukan untuk keperluan identifikasi fasa, identifikasi ukuran dan distribusi butir, identifikasi grafit pada logam cor, mengukur kedalaman pengerasan permukaan, identifikasi dekarburisasi, identifikasi rekristalisasi metalografi, identifikasi overheating, identifikasi retak/porsity, pada benda cor, identifikasi inklusi/kotoran, identifikasi presitipas, identifikasi deformasi kristal, identifikasi korosi, identifikasi hasil *heat treatment*. Dalam melakukan pengujian ini ada beberapa tahapan yang harus dilakukan, yaitu pemotongan sampel untuk dibuat spasimen, pembersihan jika

diperlukan, penggerindaan dan pengamplasan, pemolesan, etsa, pengamatan mikroskop dan pemotretan.

a) Pemotongan sampel untuk dibuat spesimen,

Dalam pemotongan sampel menjadi suatu spesimen yang akan diamati harus diperhatikan beberapa hal agar diperoleh hasil pemotongan yang baik, antara lain pemilihan lokasi pemotongan yang baik, jumlah spesimen yang representatif yang diakan dipotong, dimensi pemotongan, cara pemotongan, jenis cutter, temperatur saat pemotongan, pelindung supaya tidak terjadi oksidasi, dan yang tidak kalah penting adalah pemberian kode identifikasi (nomor) pada spesimen agar tidak tertukar dengan spesimen yang lain. Pemotongan sampel menyebabkan panas antara sampel dan tidak boleh merubah struktur sampel, untuk itu pada saat pemotongan harus diberikan cairan pendingin. Pemotongan sampel menggunakan gerinda khusus.



Gambar 3.20. Mesin Potong Spesimen Logam

Sumber: <http://indonesian.universalhardnesstester.com/>

b) Pembungkakan

Pembungkakan spesimen (*mounting*) dilakukan manakala spesimen uji berukuran kecil sehingga akan sangat menyulitkan dalam pemegangan pada saat penggerindaan atau pengamplasan. Mounting dilakukan dengan menempatkan potongan spesimen dalam suatu tempat, kemudian dituangkan ke dalamnya campuran resin dan pengeras. Setelah kering dan mengeras, maka spesimen dapat digerinda/amplas untuk dihaluskan permukaannya.



Gambar 3.21. Proses pembersihan

Sumber: <https://centraldownload07.blogspot.com>

c) Penggerindaan dan pengamplasan

Pada proses penggerindaan ini ada beberapa hal yang harus diperhatikan, yaitu penggerindaan tidak boleh menyebabkan spesimen menjadi panas, sehingga perlu pengaliran air ke permukaan ampelas selama penggerindaan. Penggerindaan tidak boleh merusak struktur yang ada, ampelas yang digunakan bertahap dari yang paling kasar. Setiap pergantian tingkat di putar 90°, dan setiap tingkatan diusahakan sampai garis yang tegak lurus hilang, permukaan spesimen harus benar benar rata dan tidak melengkung, selain itu spesimen tidak boleh terkontaminasi.



Gambar 3.22. Mesin Gerinda dan Poles

Sumber: <http://indonesian.igualitrol.com/sale-9215513-touch-screen>

d) Pemolesan

Pemolesan dilakukan setelah proses penggerindaan/pengamplasan selesai, dan untuk menjadikan permukaan spesimen halus mengkilat seperti kaca dan tanpa goresan dilakukan pemolesan dengan menggunakan kain bludru yang diletakan dipiringan putar mesin poles dengan diberikan pasta alumina. Hal-hal yang harus diperhatikan selama pemolesan antara lain, bekas ampelas dipastikan benar-benar halus, pemolesan hingga garis-garis bekas ampelas hilang, pada piringan poles tidak boleh kotoran, tidak boleh terjadi kontaminasi dengan zat kimia/lemak, bahan poles tidak boleh bereaksi dengan benda uji, pemolesan harus merata dan permukaan spesimen tidak boleh teroksidasi.

e) Etsa

Proses ini dilakukan dengan mencelupkan permukaan spesimen ke dalam cairan etsa dalam waktu tertentu, kemudian mencuci dengan air hangat untuk menghentikan reaksi dan mengeringkannya. Melalui proses ini akan tampak batas butir dan struktur pada permukaan spesimen, sehingga memudahkan untuk pengamatan. Hal-hal yang harus diperhatikan selama proses etsa adalah permukaan benda uji harus bersih, tidak berminyak, tidak tersentuh tangan

dan tidak boleh teroksidasi, dan tidak terdapat goresan lagi. Jenis larutan etsa yang digunakan harus sesuai dengan standard, waktu etsa harus diperhatikan, etsa harus merata diseluruh permukaan dan segera dihentikan ketika sampai pada waktunya, kemudian tunggu sampai spesimen yang telah di etsa kering dan diamati dengan mikroskop. Jika terjadi gagal etsa, maka spesimen harus di ampelas ulang.



Gambar 3.23. Mikroskop Optik

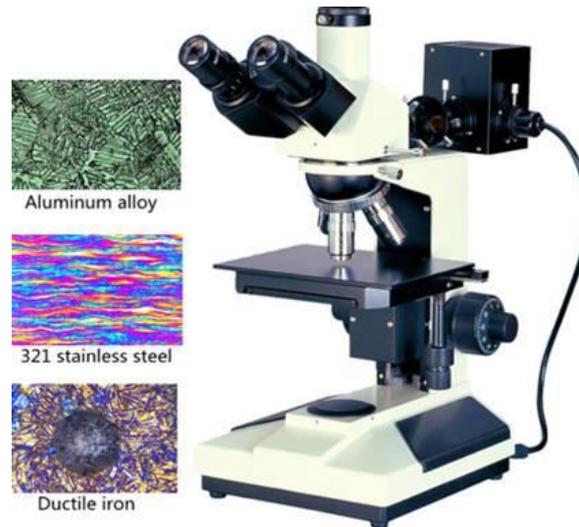
Sumber: <http://indonesian.tmteck-ndt.com/sale-127161>

Berikut adalah jenis etsa dan penggunaannya:

1. Nital digunakan untuk baja karbon.
2. Picral digunakan untuk baja yang telah diberi laku panas.
3. Vilella's reagent untuk menampakkan batas butir austenit.
4. Sodium meta bisulfit untuk menampakkan martensit gelap.
5. Marshall's reagent untuk menampakkan batas butir ferit.

f) Pengamatan mikroskop dan pemetretan.

Tahapan yang harus diketahui dalam pengamatan struktur mikro adalah mengetahui cara pengoperasian mikroskop optik yang digunakan. Perbesaran gambar dimulai dengan perbesaran yang kecil (50x, 100x, dst). Untuk memperoleh gambar yang jelas, maka pencahayaan yang cukup. Hasil etsa harus memberikan efek kontras pada mikroskop. Pada saat pengamatan perlu untuk memilih obyek yang paling menarik pada struktur mikro dan mendekati perkiraan, dan terakhir untuk memudahkan analisis maka gambar harus benar-benar fokus dan siap untuk di potret. Hasil identifikasi kemudian dicatat.



Gambar 3.24. Alat Pengamatan dan Hasilnya

Sumber: <https://www.google.ru/search?q=gambar+metalograi&newwindow>

C. Latihan Soal

Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut untuk me-review kedalaman pemahaman Anda tentang materi pada BAB III!

1. Apa yang dimaksud dengan sifat mekanik logam?
2. Sebutkan jenis-jenis sifat mekanik logam yang Anda ketahui!
3. Apa yang dimaksud dengan *destructivr test* (DT)? Berikan contohnya!
4. Apa yang dimaksud dengan *Non destructivr test* (NDT)? Berikan contohnya!
5. Sebutkan jenis metode pengujian kekerasan yang Anda ketahui!
6. Jelaskan apa yang dimaksud daerah proporsional dan daerah plastis dalam kurva tegangan tarik!
7. Apa yang dimaksud dengan yield point dan rupture point?
8. Jelaskan pemanfaatan dari uji lengkung!
9. Jelaskan pemanfaatan dari uji tekan!
10. Pengujian impact dilakukan dengan dua metode, yaitu charpy dan izzot, jelaskan perbedaan keduanya!
11. Sebutkan urutan preparasi sampel metalografi secara benar!
12. Sebutkan jenis cairan etsa dan pemanfaatannya dalam metalografi!

BAB IV

IKATAN ATOM DAN STRUKTUR MIKRO LOGAM *(ATOMIC BONDING AND MICROSTRUCTURE OF METALS)*

A. Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan materi ini, maka mahasiswa/i diharapkan mampu mengenal, memahami dan menjelaskan tentang hal-hal terkait ikatan atom dan struktur mikro logam (*atomic bonding and microstructure of metals*).

B. Penyajian Materi

4.1. Ikatan Atom Logam (*Atomic Bonds of Metals*)

Ikatan Atom Logam (*metal atomic bondture*) adalah suatu kondisi logam, dimana logam terdiri atas ukuran terkecil yang disebut atom. Istilah *atom* berasal dari kata sifat dari bahasa Yunani Kuno, *atomos*, yang berarti "tidak dapat dibagi". Para kimiawan pada abad ke-19 mulai menggunakan istilah ini untuk menjelaskan berat relatif dari satuan massa pada setiap unsur kimia, setiap kelipatannya membentuk sebuah rumus yang menentukan susunan gravimetri dari molekul yang ada pada senyawa kimia. Sekitar masa pergantian abad ke-20, para fisikawan menemukan bahwa apa yang disebut "atom yang tidak dapat dipecah" sebenarnya adalah gabungan berbagai partikel subatom (terutama, elektron, proton dan neutron) yang dapat ada secara terpisah dari satu sama lain melalui berbagai eksperimen menggunakan elektromagnetisme dan peluruhan radioaktif. Bahkan, pada suatu keadaan ekstrem tertentu, seperti bintang neutron yang memiliki suhu dan tekanan ekstrem, atom tidak dapat terbentuk sama sekali. Karena atom yang ditemukan dapat dibagi, fisikawan kemudian menciptakan istilah "partikel elementer" untuk menyebut partikel yang "tak bisa dibagi". Bidang ilmu yang mempelajari partikel subatomik adalah fisika partikel, dan di bidang ini para fisikawan berharap dapat menemukan sifat dasar sejati suatu materi. Data mengenai berbagai sifat logam yang mesti dipertimbangkan selama proses akan ditampilkan dalam berbagai sifat mekanik, fisik, kimiawi dan teknologi bahan pada kondisi tertentu. Untuk memanfaatkan data tersebut sebaik mungkin, perlu diketahui sifat asal logam yang menyebabkan logam menjadi kuat dan bagaimana sifat itu berubah selama proses produksinya.

Bahan atau logam selalu berhubungan dengan peradaban manusia. Peradaban manusia ditandai dengan peralatan-peralatan yang digunakan, yaitu batu, perunggu, dan logam. Logam memiliki peran yang dominan dalam perkembangan teknologi. Secara umum logam teknik

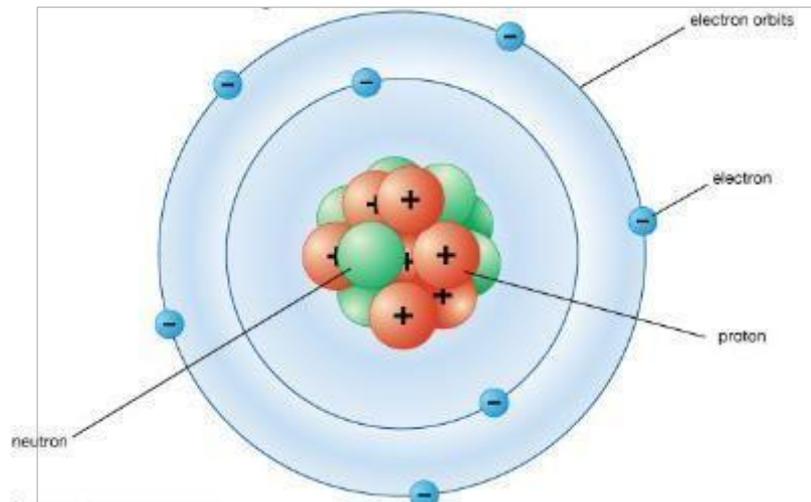
terbagi menjadi beberapa jenis, di antaranya adalah logam, polimer, keramik, komposit, semikonduktor, dan biologi. Selain itu, saat ini dikembangkan jenis logam cerdas yang dapat merespon kondisi lingkungan seperti respon makhluk hidup. Contoh logam ini adalah *shape memory alloys*, keramik *piezoelektrik*, dan *magnetostrictive*. Untuk membuat suatu produk sesuai aplikasinya, maka perlu diperhitungkan tentang struktur logam, perlakuan terhadap logam (*treatment*), dan beban kerja yang akan diterima. Sifat-sifat penting logam secara umum meliputi sifat mekanik, sifat fisik, dan sifat kimiawi. Untuk mengetahui sifat tersebut, maka perlu diketahui sifat asal logam tersebut yang nantinya dapat mempengaruhi perubahan sifat logam dan bagaimana sifat itu dapat berubah selama proses produksi yang dialaminya. Sifat-sifat suatu logam akan sangat dipengaruhi oleh:

- a) Struktur atom logam yang membentuk gugus atom.
- b) Sifat dari gugus-gugus atom
- c) Atribut yang berkaitan dengan gabungan dari gugus-gugus atom tersebut.

Untuk memudahkan dalam memahami pengertian secara mendasar tentang sifat logam, maka dalam bab ini akan dibahas tentang hubungan antara struktur atom, struktur kristalin, dan perilaku bahan dalam bentuknya yang utuh.

4.2. Jenis-jenis Ikatan Atom Logam (*Types of Metallic Atomic Bonds*)

Sesuai dengan konsep atom seorang ilmuwan bernama Niels Bohr, setiap atom terdiri dari inti atom yang terdiri dari proton yang bermuatan positif dan neutron yang tidak bermuatan. Proton dan neton memiliki massa yang mendekati sama, yaitu $1,67 \times 10^{-27}$ kg. Inti atom dikelilingi oleh sejumlah elektron yang bermuatan negatif. Massa elektron di bawah massa proton dan netron, yaitu $9,11 \times 10^{-31}$ kg. Baik proton maupun netron memiliki muatan $1,6 \times 10^{-19}$ C. Jumlah muatan elektron pada atom sama dengan muatan inti atom, sehingga secara keseluruhan, atom itu netral dan tidak bermuatan. Elektron tersusun dalam beberapa tingkatan energi atau kulit energi. Pemodelan atom menurut Bohr dapat dilihat pada gambar 30.



Gambar 4.1. Pemodelan Atom Bohr

Sumber: <https://www.britannica.com/science/Bohr-model>

Jumlah proton pada inti atom digunakan untuk penomoran atom yang dikenal dengan nomor atom (Z). Pada atom netral, jumlah elektron sama dengan jumlah atom. Sedangkan massa atom (A) merupakan jumlah dari massa proton dan netron dalam inti atom. Kadangkala terjadi pada sebuah unsur, di mana jumlah proton sama namun jumlah netronnya berbeda sehingga sebuah unsur dapat memiliki dua massa atom atau bahkan lebih yang disebut isotop. Satuan massa atom adalah *atomic mass unit* (*amu*). Penjelasan 1 *amu* bernilai $1/12$ massa atom isotop karbon 12 (^{12}C) ($A = 12,000000$). Adapun berat atom dari suatu unsur dapat dihitung berdasarkan *amu* per atom atau massa per mol logam. Dalam satu mol unsur memiliki $6,023 \times 10^{23}$ (bilangan Avogadro) atom.

Ikatan atom pada padatan secara umum terbagi menjadi dua, yaitu ikatan primer dan ikatan sekunder. Adapun ikatan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

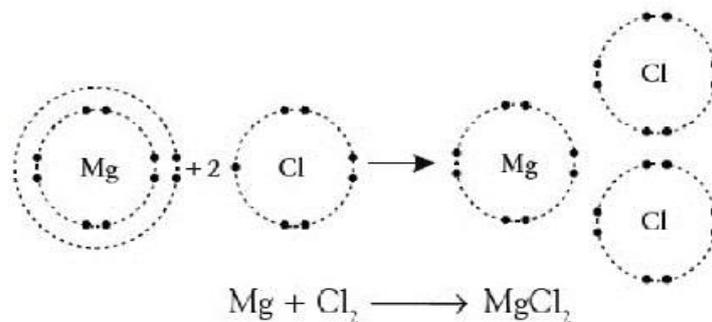
- a) Ikatan primer, ikatan yang dimiliki oleh atom-atom benda padat, seperti keramik, polimer, dan logam. Termasuk ikatan primer adalah ikatan ionik, ikatan kovalen dan ikatan logam
- b) Ikatan sekunder, ikatan yang tergolong ikatan lemah, namun tetap berpengaruh pada sifat logam. Termasuk ikatan sekunder adalah ikatan van der waals dan ikatan hidrogen.

Semua unsur dikelompokkan menurut konfigurasi elektronnya dalam tabel periodik. Dalam tabel periodik, unsur-unsur disusun berdasarkan urutan nomer atom dalam tujuh baris yang disebut periode. Susunan diatur sehingga unsur yang terletak dalam satu kolom mempunyai kemiripan elektron valensi, sifat kimia dan sifat fisiknya. Sebagian besar unsur dalam tabel periodik merupakan logam. Unsur tersebut dinamai elektropositif karena cenderung membentuk ion positif dengan cara melepaskan elektron. Sedangkan unsur yang

membentuk ion negatif dengan kecenderungan menerima elektron disebut elektronegatif. Secara umum kecenderungan unsur-unsur menerima elektron (elektronegativitas) mengalami peningkatan dari kiri ke kanan dan dari atas ke bawah dalam tabel periodik.

a. Ikatan Ionik

Ikatan ionik merupakan ikatan yang dimiliki senyawa dari unsur logam dan atom bukan logam dan merupakan ikatan yang sangat kuat. Unsur dengan ikatan ionik memiliki sifat temperatur lebur tinggi, keras, namun rapuh. Ikatan ionik terbentuk manakala atom oksigen "menangkap" dua elektron terluar dari atom magnesium (Mg). Dengan demikian, atom oksigen bertambah dua muatan negatif dan atom magnesium kehilangan dua elektron terluarnya sehingga mempunyai kelebihan dua muatan positif. Baik oksigen maupun magnesium kini memiliki delapan elektron pada kulit terluarnya dan mencapai keseimbangan kimiawi seperti gas mulia. Akan tetapi, kedua atom yang tadinya netral itu sekarang mempunyai muatan elektrostatis yang berlawanan dan inilah yang menghasilkan ikatan ionik, yang merupakan dua dimensi senyawa oksida magnesium (MgO). Sebagai ilustrasi dapat dilihat pada gambar 32.



Gambar 4.2. Konfigurasi Ikatan Atom Ionik

Sumber: <https://alkafyuone.wordpress.com/tag/ikatan-ion/>

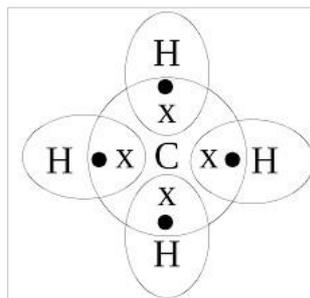
Atom yang bermuatan sejenis akan tolak menolak, sedangkan atom yang memiliki muatan berlawanan akan tarik menarik. Gaya tarik menarik antar ion positif dan negatif disebut gaya Coloumb. Besarnya gaya coloumb tergantung pada jarak kedua ion. Pada bahan utuh yang terdiri atas atom berikatan ionik, terbentuk struktur kristal yang berpola teratur dalam tiga dimensi. Tiap atom dikelilingi oleh atom dengan muatan yang berlawanan.

Kekuatan senyawa seperti ini dipengaruhi oleh kekuatan ikatan elektrostatis antar atom yang tidak sejenis, dan kerapuhannya dipengaruhi oleh ketahanan atom bermuatan terhadap usaha yang memaksanya menempati posisi yang berdekatan dengan atom yang bermuatan

sama. Oksida magnesium melawan gaya yang mendekatkan atom oksigen dan atom magnesium dengan atom sejenis, dan bila gaya tersebut cukup besar dapat menyebabkan keretakan kristal. Artinya ikatan ionik memiliki sifat getas dan isolator karena elektron valensinya yang tidak dapat bergerak bebas. Contoh unsur yang memiliki ikatan ionik di antaranya adalah NaCl dan MgO.

b. Ikatan Kovalen

Ikatan kovalen terjadi antara atom dengan empat elektron atau lebih pada kulit terluarnya, kondisi ini lazim dijumpai pada unsur non-logam. Sebuah atom tak mungkin menampung semua elektron kulit terluar atom lain. Apabila itu terjadi, maka kulit elektron terluar mengalami kelebihan elektron (jumlah ideal adalah delapan elektron). Apabila terdapat empat elektron atau lebih pada kulit terluar, maka mereka dapat berbagi elektron luar. Bahan yang mempunyai ikatan kovalen dapat berbentuk gas, cairan, atau padatan dan memiliki ikatan yang kuat. Sebagai contoh yang relevan adalah unsur karbon (C). Atom karbon memiliki empat elektron pada kulit terluar. Supaya jumlah elektron tersebut mencapai delapan, maka karbon dapat bersenyawa dengan atom karbon lain atau dengan empat buah atom yang memiliki elektron tunggal (pada kulit terluar) seperti unsur hidrogen. Dengan persenyawaan hidrogen dan karbon akan terbentuk metana (CH_4).



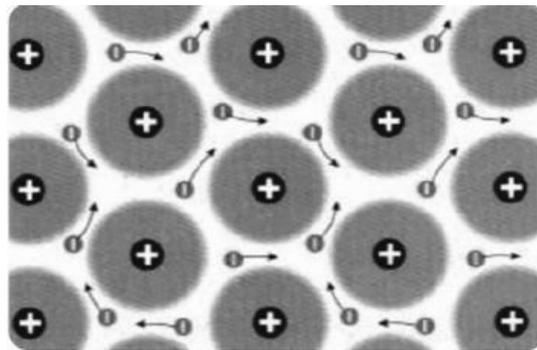
Gambar 4.3. Konfigurasi Ikatan Kovalen

Sumber: <https://menurutkimia.blogspot.com/2017/03/>

Dengan dua atom yang memiliki elektron ganda pada kulit terluar seperti oksigen, maka karbon membentuk dioksida karbon (CO_2). Dan bila bersenyawa dengan atom karbon lain, akan terbentuk dua jenis kristal karbon. Bentuk pertama adalah intan. Intan memiliki struktur kubik dengan rangkaian tetragonal, memiliki energi tinggi, titik lebur hingga $>3.550^\circ\text{C}$. Bentuk kedua adalah grafit yang memiliki atom karbon dalam rangkaian bidang heksagonal. Grafit dikenal dengan sifat pelumasnya akibat susunan bidangnya yang dapat saling bergeseran. Ikatan kovalen juga terjadi pada bismuth, namun energinya rendah dan titik leburnya hanya 270°C . Contoh unsur yang memiliki ikatan kovalen adalah Si dan C (intan).

c. Ikatan Logam

Ikatan logam ada pada unsur logam yang secara umum mempunyai 3, 4, atau bahkan 5 elektron valensi. Atom-atom logam tersusun padat menyebabkan elektron valensi setiap atom bebas bergerak dan tidak terikat pada satu atom. Dalam keadaan padat, jenis ikatan yang terbentuk pada unsur logam menjadi sangat berbeda yang menjadi ciri khas logam. Elektron pada kulit terluar bergerak bebas sebagai awan elektron melalui ruang antar inti yang bermuatan positif bersama kulit elektron lainnya yang menjadikannya sebagai konduktor panas dan listrik serta menjadikan logam menjadi ulet pada temperatur kamar. Sifat ikatan logam bervariasi antara 68kJ/mol (0,7eV/atom) dan titik lebur -39°C seperti terdapat pada merkuri hingga 850kJ/mol (8,8 eV/atom) dengan titik lebur 3.410°C seperti terdapat pada tungsten.



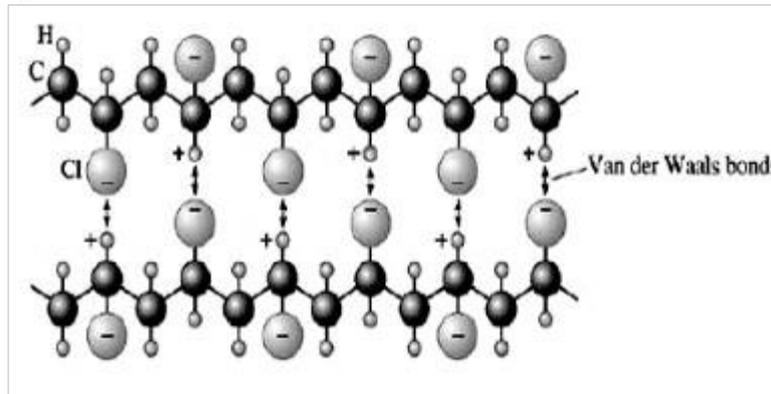
Gambar 4.4. Konfigurasi Ikatan Logam

Sumber: <https://www.ilmukimia.org/2013/01/ikatan-logam.html>

Inti dan kulit elektron di bagian dalam dianggap sebagai bola keras yang tersusun padat dan berpola teratur serta membentuk susunan kristal seperti pada gambar 34. Susunan ion positif diikat oleh awan elektron bermuatan negatif membentuk ikatan khas yaitu ikatan logam. Oleh karena ion tidak memiliki kecenderungan untuk menempati lokasi tertentu, ion dapat bergerak dalam kisi kristal tanpa merusak pola yang teratur. Contoh unsur yang memiliki ikatan logam adalah Hg, Al, Fe, dan W.

d. Ikatan Van der Waals

Ikatan van der Waals terdapat pada semua jenis atom. Keberadaannya diabaikan karena sifat ikatannya yang lemah dibandingkan ikatan utama. Ikatan tersebut berkisar 10kJ/mol (0,1 eV/atom). Ikatan van der Waals ada pada gas-gas mulia yang mengalami proses kondensasi sehingga fasanya berubah menjadi cair pada saat temperatur yang sangat rendah.



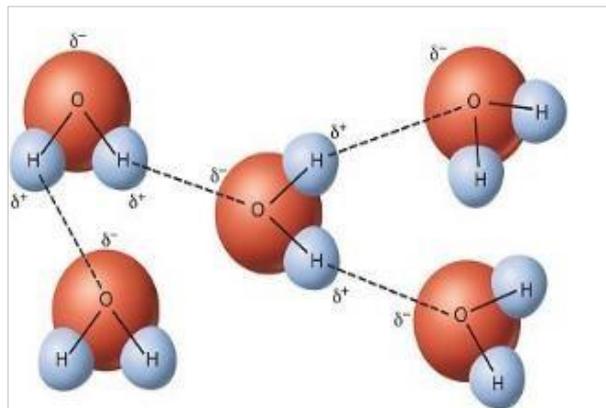
Gambar 4.5. Konfigurasi Ikatan Van der Waals

Sumber: <https://logamurgi.blogspot.com/2013/10/1.html>

Pada saat fasa gas, atom-atom gas mulia dalam keadaan bebas, namun pada saat terkondensasi, atom-atom tersebut membentuk ikatan namun lemah yang dikenal dengan gaya van der waals. Ikatan van der waals terdapat pada molekul halogen terkondensasi, semisal Cl_2 , Br_2 , I_2 dalam keadaan cair maupun padat. (Bondan. T, 2010)

e. Ikatan Hidrogen

Selain ikatan van der waals, masih ada satu lagi ikatan sekunder yaitu ikatan hidrogen. Ikatan hidrogen terjadi pada molekul polar pada saat atom hidrogen yang di miliknya terikat dengan atom lain secara kovalen. Ikatan hidrogen merupakan ikatan sekunder terkuat.



Gambar 4.6. Konfigurasi Ikatan Hidrogen

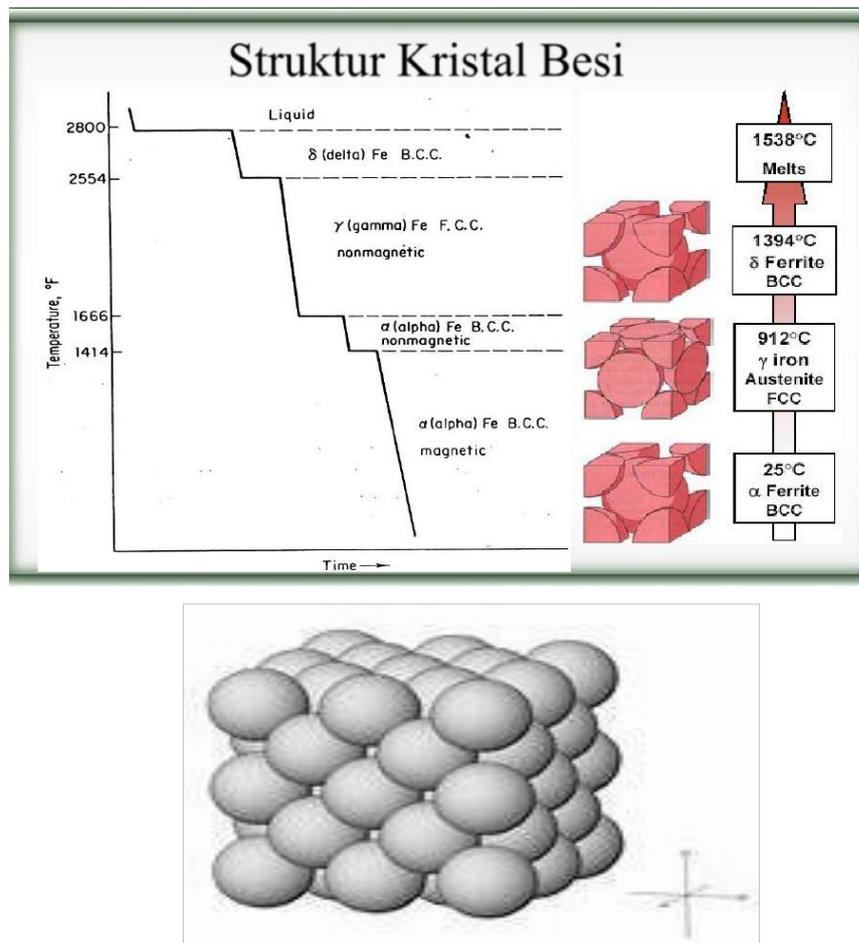
Sumber: <https://usaha321.net/contoh-ikatan-hidrogen-dalam-kehidupan.html>

Contoh ikatan hidrogen adalah flour (H-F), nitrogen pada NH_3 dan oksigen pada H_2O . Dalam setiap ikatan H-O, H-F atau H-N elektron tunggal hidrogen bergabung dengan elektron lain yang menyebabkan ujung hidrogen yang bermuatan positif dan merupakan proton dari ikatan tidak tertutup oleh elektron dan menarik ujung molekul lain yang bermuatan negatif.

Kekuatan ikatan hidrogen bisa mencapai 51kJ/mol (0,52 eV/molekul) serta memiliki titik lebur dan titik didih yang tinggi dengan adanya ikatan hidrogen.

4.3. Struktur Mikro Logam (*Microstructure of Metals*)

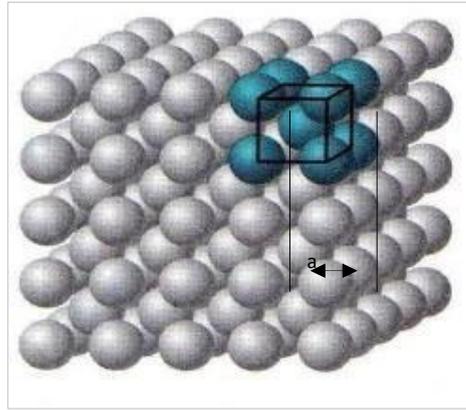
Semua jenis logam, sebagian besar keramik serta beberapa polimer membentuk kristal ketika bahan tersebut membeku. Artinya atom-atom unsur tersebut mengatur diri secara teratur dan berulang dalam pola 3 dimensi. Struktur semacam ini disebut *kristalin* atau kristal tunggal, seperti pada (gambar 4.7) dibawah ini.



Gambar 4.7. Bentuk Struktur Kristal

Sumber: <https://staff.aist.go.jp/nomura-k/english/itscgallery-e.htm>

Hampir semua padatan kristalin merupakan logam yang tersusun oleh butir-butir kristal yang dikenal dengan polikristalin. Logam polikristalin juga terbentuk melalui pendinginan. Logam yang lain adalah logam *non-kristalin*, yaitu logam yang tidak memiliki struktur atom yang berulang dan teratur pada jarak yang jauh. Logam ini juga disebut logam *amorf*.



Gambar 4.8. Bentuk Sel Satuan

Sumber: <http://mantrinxagmcc.blogspot.com/2015/05/>

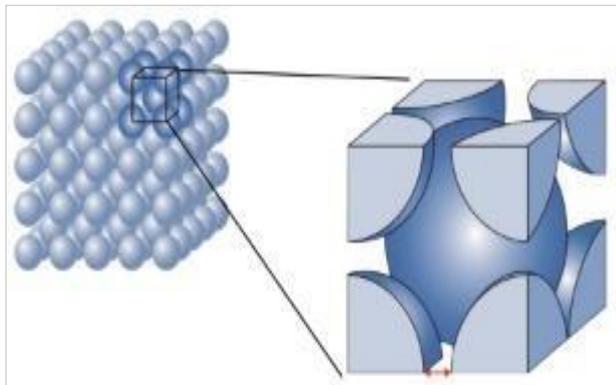
Pola teratur dalam jarak panjang yang menyangkut puluhan jarak atom dihasilkan oleh koordinasi atom dalam bahan. Pola ini kadang-kadang ikut menentukan bentuk luar suatu kristal, seperti bentuk bintang enam bunga salju. Permukaan datar batuan mulia, kristal kwarsa (SiO_2), garam (NaCl) merupakan penampilan luar dari pengaturan di dalam kristal itu sendiri. Dari setiap contoh tadi, pengaturan atom di dalam kristal tetap ada, meskipun bentuk permukaan luarnya berubah. Struktur dalam kristal kwarsa tidak berubah meskipun permukaan luar berubah karena gesekan sehingga berbentuk seperti butiran pasir pantai yang bulat-bulat. Hal yang sama dapat kita jumpai pada pengaturan heksagonal molekul air dalam es atau bunga salju. Tata jangkau panjang yang merupakan karakter kristal terlihat seperti pada gambar 38. Model ini menampilkan pola-pola atom kisi yang terjadi bila terdapat satu jenis atom. Karena pola atom ini berulang secara tak terhingga, maka mudahnya kisi kristal ini dibagi dalam sel satuan. Sel satuan inilah yang memiliki volume terbatas, masing-masing memiliki ciri sama, dan memiliki bentuk kristal menyeluruh. Jarak yang selalu terulang yang disebut konstanta kisi dalam pola jangkau panjang kristal menentukan ukuran sel satuan. Dimensi yang berulang yang pada gambar 38 diberi notasi “a” merupakan dimensi sisi sel satuan. Karena pola kristal pada gambar tersebut identik dalam tiga arah tegak lurus, sel satuan ini berbentuk kubik dan “a” merupakan konstanta kisi dalam ketiga arah koordinat. Dalam kristal non-kubik, konstanta kisinya berbeda dalam tiga arah koordinat.

Titik sudut sel satuan dapat bertempat dimana saja dalam suatu kristal, dapat berada dipusat atom, di dalam atom-atom atau diantara atom-atom, seperti titik pada gambar 39. Volume yang kecil tadi dapat diduplikasikan dengan volume yang identik disebelahnya dengan catatan sel tadi memiliki orientasi yang sama dengan pola kristal. Kristal kubik

Kristal kubik terbagi atas tiga bentuk kisi, yaitu kubik pemusatan ruang, kubik pemusatan sisi, dan kubik sederhana. Kisi adalah pola yang berulang dalam tiga dimensi yang terbentuk dalam kristal. Kebanyakan logam memiliki kisi kubik pemusatan ruang (*body centered cubic/bcc*) atau kisi kubik pemusatan sisi (*face centered cubic/bcc*). Sebagai penjelasan:

a) Kubik pemusatan ruang

Logam memiliki kubik pemusatan ruang. Pada temperatur ruang sel satuan logam mempunyai atom pada tiap titik sudut kubus dan satu atom pada pusat kubus (Gambar 41). Logam merupakan logam yang paling umum dengan struktur kubik pemusatan ruang, tetapi bukan satu-satunya. Unsur lain yang memiliki struktur bcc adalah krom, tungsten, dll.



Gambar 4.11. Struktur kubik pemusatan ruang (bcc)

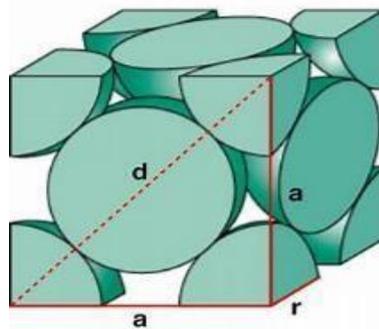
Sumber: <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers>

Tiap atom logam dalam struktur kubik pemusatan ruang (bcc) dikelilingi oleh delapan atom tetangga. Kondisi ini berlaku untuk setiap atom, baik yang terletak pada titik sudut maupun atom dipusat sel satuan. Oleh karena itu setiap atom mempunyai lingkungan geometrik yang sama. Sel satuan logam bcc mempunyai dua atom. Satu atom dipusat kubus dan delapan seperdelapan atom pada delapan titik sudutnya.

b) Kubik pemusatan sisi

Pengaturan atom dalam tembaga (Gambar 38) tidak sama dengan pengaturan atom dalam logam, meski keduanya kubik. Disamping atom pada setiap titik sudut sel satuan tembaga, terdapat sebuah atom ditengah setiap bidang permukaan, namun tak satupun dititik pusat kubus. Struktur kubik pemusatan sisi (kps) ini lebih sering dijumpai pada logam, antara lain, aluminium, tembaga, timah hitam, perak dan nikel mempunyai pengaturan atom seperti ini (demikian pula halnya dengan logam pada temperatur tinggi). Logam dengan struktur fcc

mempunyai empat kali lebih banyak atom. Kedelapan atom pada titik sudut menghasilkan satu atom, dan keenam bidang sisi menghasilkan 3 atom per sel satuan (Gambar 42). Faktor tumpukan untuk logam fcc adalah 0.74 dan ternyata lebih besar dari nilai 0.68 untuk logam bcc. Hal ini memang wajar oleh karena setiap atom dalam logam bcc dikelilingi oleh delapan atom.



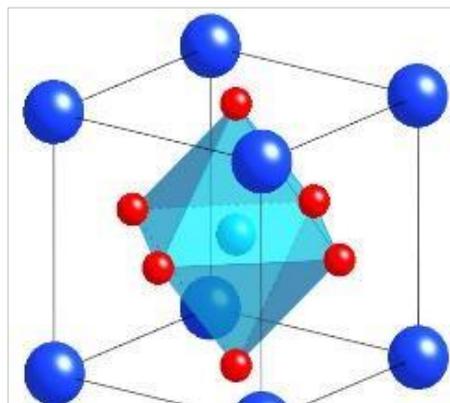
Gambar 4.12. Struktur kubik pemusatan sisi (fcc)

Sumber: <https://socratic.org/questions/iron-crystallizes-in-a-face-centered>

Sedang setiap atom dalam logam bcc mempunyai dua belas tetangga. Seperti pada gambar 42 terlihat bahwa atom pada sisi depan mempunyai empat tetangga, empat tetangga yang bersinggungan dengannya dibagian belakang dan empat lagi yang serupa dibagian depan.

c) Kubik sederhana

Struktur sederhana ini bisa lebih rumit dibandingkan struktur bcc maupun fcc. Pada struktur fcc dan bcc struktur diulang pada pusat dari sel satuan dan pada sudut-sudutnya. Pada sel kubik sederhana tidak memiliki titik ulang pada titik lokasi pusat seperti pada fcc dan bcc. Contoh struktur sederhana terdapat pada alkali halida, CsCl, kuningan yang merupakan paduan seng dan tembaga, kalsium titanat, dan CaTiO_3 . (Ca biru tua, Ti biru terang, O merah).

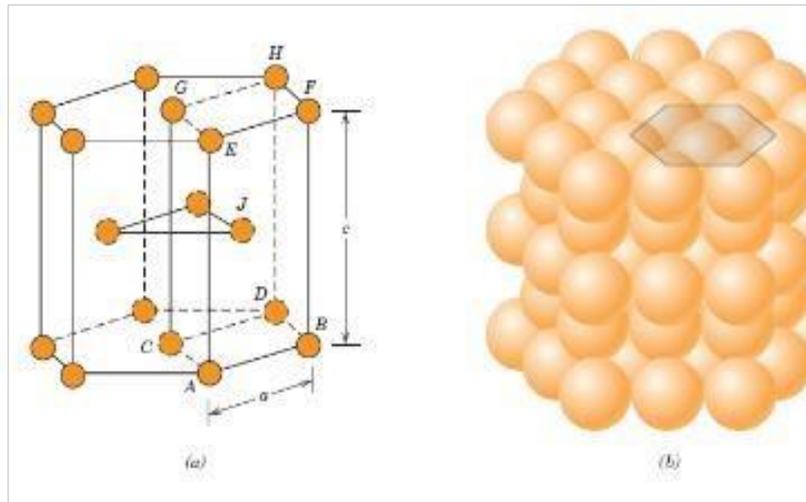


Gambar 4.13. Struktur kubik sederhana CaTiO_3

Sumber: <http://som.web.cmu.edu/structures/S059-CaTiO3.html>

.4.4. Struktur Non-Kubik Logam (*Metallic Non-Cubic Structure*)

Selain struktur kubik, masih ada lagi struktur non kubik yang disebut dengan kristal heksagonal. Struktur ini juga disebut struktur logam tumpukan padat heksagonal (hcp, *hexagonal close-packed*). Ciri struktur ini setiap atom pada suatu lapisan tertentu berada tepat di atas atau di bawah lokasi interstisial di antara tiga atom pada lapisan berikutnya. Maka setiap atom di suatu lapisan bersinggungan dengan enam atom di bidangnya sendiri, tiga atom di lapisan bawahnya, dan tiga atom di lapisan atasnya. Faktor penumpukan hcp sama dengan fcc yaitu 0,74. Hal ini terjadi karena bilangan koordinasi keduanya sama, yaitu 12.



Gambar 4.14. Sel satuan heksagonal

Sumber: <https://futurummechanics.blogspot.com/2014/07/>

Selain struktur kubik dan struktur hexagonal, masih terdapat unsur-unsur lain yang jumlahnya cukup banyak termasuk sistem ortorombik pada unsur Iodin (I_2), polietilena, unsur heksagonal grafit yang berbeda dengan heksagonal lain, logam karbida, dan struktur tetragonal pada barium titanat ($BaTiO_3$). Namun pada kesempatan ini tidak dibahas secara mendalam.

C. Latihan

Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut untuk mereview kedalaman pemahaman Anda tentang materi pada BAB IV!

1. Jelaskan pengertian ikatan ionik, kovalen dan logam!
2. Jelaskan pengertian proton, elektron dan neutron!
3. Apa yang dimaksud dengan ikatan logam ionik?
4. Apa yang dimaksud dengan ikatan logam kovalen?

5. Apa yang dimaksud ikatan Van der Waals?
6. Apakah yang dimaksud struktur kristal kubik?
7. Sebutkan jenis struktur kristal kubik!
8. Sebutkan struktur atom yang termasuk non-kubik!
9. Apa yang dimaksud dengan struktur kubik sederhana?
10. Menurut Anda mana yang lebih kuat logam yang jumlah atomnya sedikit atau yang lebih banyak jumlah atomnya?

BAB V

KETIDAKSEMPURNAAN LOGAM **(*DISABILITY OF METALS*)**

A. Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan materi ini, maka mahasiswa/i diharapkan mampu mengenal, memahami dan menjelaskan tentang berbagai ketidaksempurnaan logam (*disability of metals*).

B. Penyajian Materi

5.1. Cacat Kristal

Untuk membentuk sebutir kristal dari suatu logam membutuhkan berjuta atom. Dengan jumlah sebanyak itu tentu sangat memungkinkan terjadinya kecacatan bentuk maupun susunan pada kristal. Kecacatan dalam jumlah banyak nantinya akan turun mempengaruhi karakter dari suatu logam.

a. Ketidakmurnian Bahan Padat

Dalam suatu kondisi suatu benda dapat dijumpai dalam kondisi murni (*pure*), tidak terkecuali logam-logam teknik. Namun dalam kondisi tertentu logam yang murni tidak dapat langsung digunakan, misalkan karena harganya yang terlalu mahal, maka perlu ditambahkan campuran untuk mengurangi harga dengan turunya sedikit kemurnian. Atau karena untuk keperluan tertentu, maka sifat logam harus dimodifikasi dengan cara mencampurkan logam yang lain untuk merubah sifatnya. Sebagai contoh yang sering kita jumpai di masyarakat adalah emas dengan berbagai kadar karat yang dimiliki. Misalkan emas 22 karat seberat 10 gram, memiliki jumlah kandungan murni sebanyak $(22/24) \times 10 \text{ gram} = \pm 9,16 \text{ gram}$. Lain halnya jika emas tersebut 23 karat, maka kandungan emas murninya adalah $(23/24) \times 10 \text{ gram} = \pm 9,58 \text{ gram}$. Dengan penambahan campuran dalam emas, maka emas menjadi sedikit lebih kaku dari sifat aslinya, selain itu harganya menjadi lebih terjangkau. Dalam dunia industri banyak sekali logam yang merupakan hasil rekayasa dengan cara mengatur jenis paduan dengan prosentase tertentu untuk memperoleh logam yang sesuai dengan kebutuhan. Dengan demikian kemurnian logam itu tidak selalu dapat langsung digunakan untuk membuat benda/komponen tertentu.

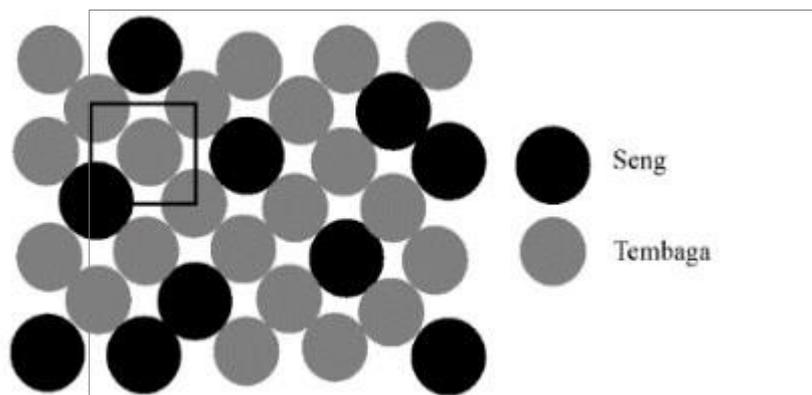
b. Larutan Padat pada Logam

Kesamaan struktur elektron dan kesamaan ukuran antara atom yang larut dan pelarut akan cenderung membentuk larutan padat. Sebagai contoh adalah logam kuningan (*brass*)

yang merupakan campuran tembaga (*Copper/Co*), dan seng (*Zinc/Zn*). Co dan Zn, keduanya memiliki ukuran jarijari atom 0,127nm dan 0,139 nm. Elektron valensi keduanya 28, kristal yang terbentuk juga sama dengan bilangan kordinasinya 12. Manakala tembaga ditambah dengan seng, maka dalam kisi kubus-pusat-sisi (kps) kedudukan atom tembaga dapat digantikan dengan mudah oleh atom seng bahkan tercapai hingga 40%. Distribusi yang terjadi pada larutan padat Co dan Zn ini terjadi dalam susunan acak. Larutan yang terbentuk dengan cara ini disebut sebagai larutan substitusi dan paling umum terjadi pada sistem atom logam.

c. Larutan Padat Substitusi

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, bahwa larutan padat substitusi paling banyak terjadi pada logam. Contoh lain selain kuningan adalah logam monel yang merupakan campuran dari tembaga (Co) dan nikel (Ni). Atom-atom dari kedua logam itu dapat saling menggantikan dalam prosentase jumlah berapapun antara 0% hingga 100%. Paduan tembaga dan nikel selalu memiliki struktur pemusatan sisi (fcc). Contoh lain dari terjadinya substitusi atom dalam larutan padat adalah perunggu yang merupakan campuran timah putih dan tembaga. Hanya saja atom dari timah putih hanya mampu menggantikan atom tembaga dalam jumlah yang terbatas, tidak seperti tembaga-nikel.



Gambar 5.1. Bentuk Larutan Padat Substitusi Acak

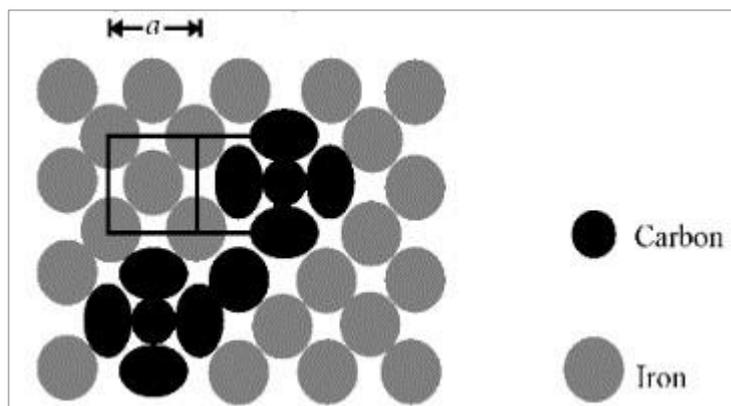
Sumber: <https://docplayer.info/30643453-Struktur-padatan-anorganik.html>

Syarat untuk terjadinya larutan padat substitusi dalam jumlah banyak adalah ukuran atom yang sama atau mendekati sama. Tingkat kelarutan tembaga-nikel paling tinggi dibandingkan yang lain karena keduanya memiliki kesamaan struktur kps dan jari-jari atom yang hampir sama yaitu 0,1246nm dan 0,1278nm. Dengan bertambahnya perbedaan ukuran jari-jari atom, maka akan berkurang kesudian substitusi atom logam. Sebagai contoh, atom aluminium hanya mampu menggantikan kedudukan atom tembaga sampai 20% saja. Hal ini terjadi karena perbedaan jari-jari atom aluminium 0,1431nm, lebih besar dari jari-jari atom

tembaga, yaitu 0,1278nm. Apabila perbedaan ukuran jari-jari atom $> 15\%$, maka akan menjadikan sulitnya terjadi proses substitusi tersebut. Dan yang lebih sulit lagi untuk terjadi substitusi manakala struktur atom dan valensi logam yang dicampurkan berbeda.

d. Larutan Padat Interstisial

Larutan padat yang bisa terbentuk adalah larutan interstisi, di mana terdapat atom-atom kecil yang dikelilingi atom-atom yang ukurannya lebih besar. Contohnya adalah tercampurnya karbon dengan logam pada saat logam dipanaskan melebihi 912°C . Kondisi logam pada temperatur tersebut membentuk struktur kubik pemusatan sisi (*face-centered-cubic* / fcc) sehingga memungkinkan terbentuknya celah pada pusat sel satuan.



Gambar 5.2. Bentuk Larutan Padat Interstisial

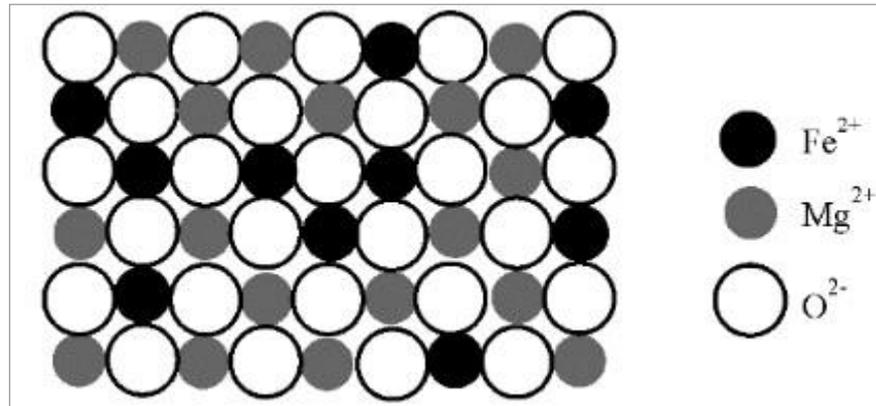
Sumber: <https://docplayer.info/30643453-Struktur-padatan-anorganik.html>

Celah tersebut akan ditempati oleh atom karbon yang memang memiliki ukuran lebih kecil daripada atom logam, sehingga terbentuklah larutan padat logam-karbon. Pada temperatur $< 912^{\circ}\text{C}$, struktur logam akan kembali pada kubik pemusatan ruang (*body-centered-cubic* / bcc) menyebabkan celah antar atom menjadi lebih sempit, sehingga kesediaan larut karbon dalam struktur logam bcc menjadi berkurang.

e. Larutan Padat pada Senyawa

Ukuran atom atau ukuran ion adalah faktor yang sangat berpengaruh dalam pembentukan larutan padat substitusi yang terjadi dalam fasa logam maupun fasa ionik. Larutan padat ionik dapat terlihat pada contoh gambar 47. Struktur yang terbentuk adalah struktur MgO dengan ion Fe^{2+} menggantikan Mg^{2+} . Pergantian terjadi karena jari-jari kedua ion memiliki ukuran 0,066nm dan 0,074nm. Pada kondisi yang lain, ion Mg^{2+} tidak dapat menggantikan ion Ca^{2+} , sebab jari-jari ion Ca^{2+} lebih besar ukurannya, yaitu 0,099nm. Pada larutan padat senyawa keramik lebih rumit lagi dibandingkan larutan padat logam.

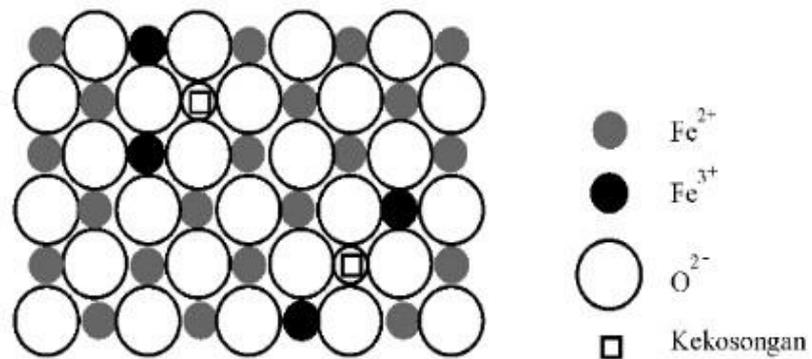
Sebab untuk dapat larut harus terjadi kesamaan antara muatan ion valensi baru dan muatan valensi ion.



Gambar 5.3.. Larutan padat substitusi dalam senyawa

Sumber: <https://docplayer.info/30643453-Struktur-padatan-anorganik.html>

Manakala terjadi kesamaan jari-jari atom, namun terdapat selisih muatan (terjadi kekeurangan) maka akan sangat sulit terjadi substitusi. Misalkan Li^+ tidak dapat menggantikan Mg^{2+} yang ada dalam MgO . Bisa terjadi substitusi apabila terjadi suatu perubahan yang menghilangkan perbedaan muatan.



Gambar 5.4 Struktur yang Cacat

Sumber: <https://docplayer.info/30643453-Struktur-padatan-anorganik.html>

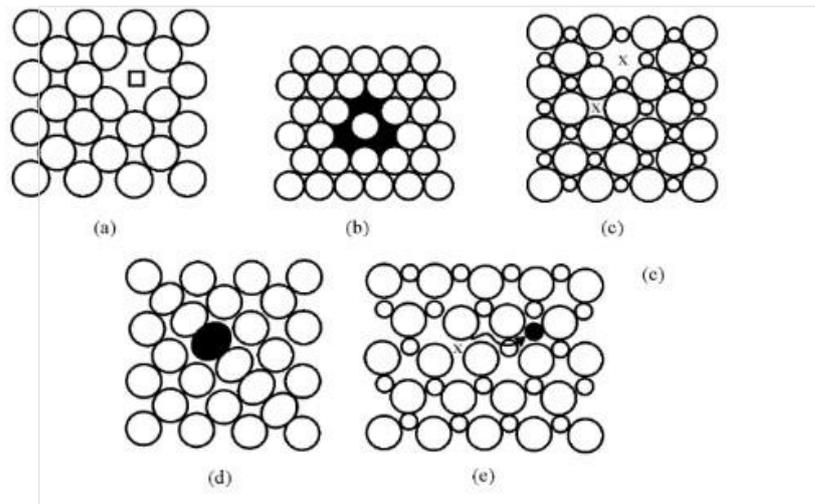
5.2. Ketidaksempurnaan Kristal Logam (*Crystalline Disability of Metals*)

Ketidaksempurnaan kristal logam (*crystalline disability of metals*) adalah hal yang sangat mungkin terjadi, dan untuk menyeimbangkan ketidakseimbangan muatan diperlukan kekosongan. Kekosongan itu bisa berupa cacat titik yaitu adanya kekosongan satu atom atau beberapa atom saja. Namun jika kecacatan itu berupa garis, maka disebut dengan cacat garis. Cacat garis membantu terbentuknya deformasi platis ketika kristal logam mengalami gaya

geser. Dengan demikian tidak selalunya kecacatan logam itu hal yang tidak baik, sebab dengan adanya kecacatan itu justru mampu meningkatkan keuletan dan kekuatan suatu logam.

a) Cacat Titik

Cacat ini terjadi karena adanya atom yang hilang dalam kristal. Cacat ini terjadi pada saat proses pengkristalan yang menyebabkan penumpukan atom, atau karena bertambahnya energi thermal akibat temperatur tinggi.



Gambar 5.5 Struktur yang Cacat

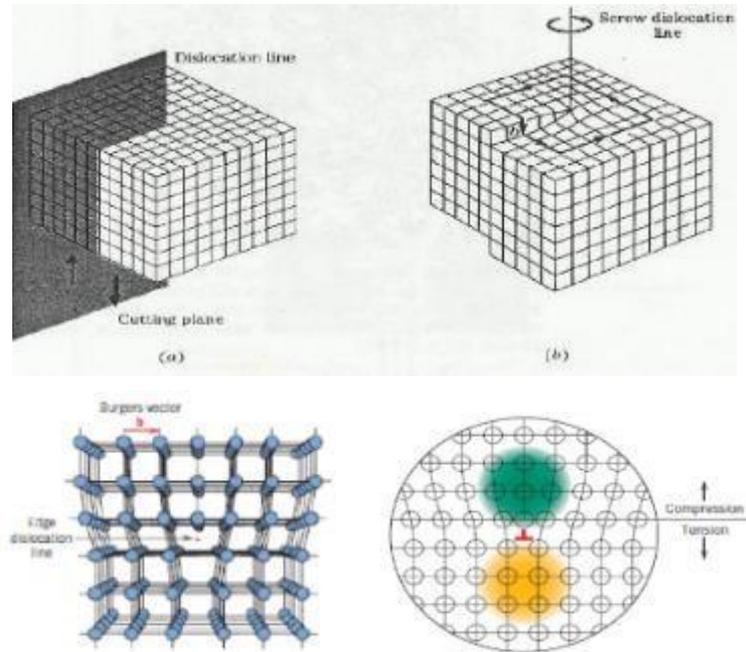
Sumber: <https://docplayer.info/30643453-Struktur-padatan-anorganik.html>

1. Cacat karena adanya kekosongan tunggal
2. Cacat karena adanya kekosongan dua atom
3. Cacat pasangan ion (cacat Schottky)
4. Cacat karena munculnya sisipan
5. Cacat karena adanya ion terpisah (cacat Frenkel)

b) Cacat Garis dan Cacat Ulir

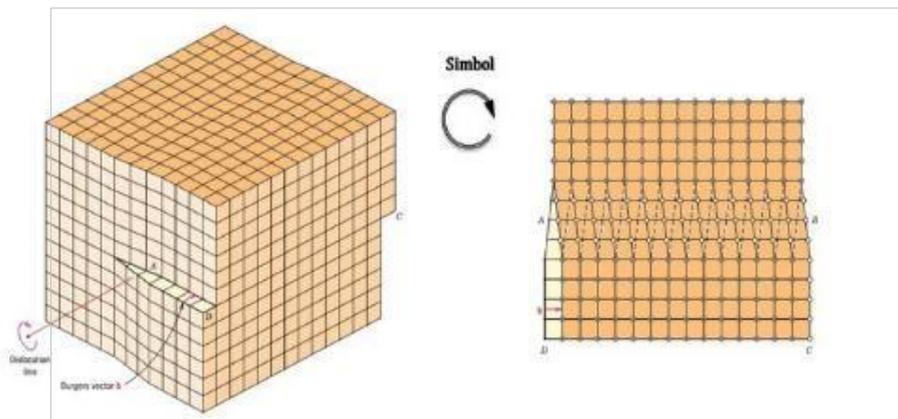
Dislokasi merupakan cacat garis yang paling banyak terjadi dalam kristal. Sebagai penjelasan, dislokasi adalah adanya satu bidang atom yang tersisip pada struktur kristal. Dengan adanya dislokasi garis akan memunculkan daerah yang mengalami tegangan (daerah warna kuning pada gambar 5.5) dan tekanan (daerah warna hijau pada gambar 5.5) di sekitarnya dan meningkatkan energi di sepanjang area dislokasi. Besar pergeseran atom di sekitar daerah dislokasi dinyatakan sebagai vektor geser (b^*), lihat gambar 5.5. Arah vektor geser tegak lurus pada garis dislokasi.

Selain dislokasi garis, ada juga yang disebut dislokasi ulir dengan garis kecacatan terletak pada sepanjang sumbu ulir. Garis cacat yang muncul arahnya sejajar dengan vektor gesernya. Pada daerah sekitar dislokasi ulir ini juga terdapat energi tambahan yang diakibatkan oleh bergesernya atom atom di area dislokasi.



Gambar 5.6. Dislokasi garis dan dislokasi ulir

Sumber: <https://docplayer.info/32208596-Pengaruh-sistem-geser-susunan-atom>
<https://docplayer.info/73048853-Konsep-dislokasi-pengertian-dislokasi.html>



Gambar 5.7. Proses terjadinya dislokasi

Sumber: <https://slideplayer.info/slide/11899641/>

Dislokasi muncul dalam bentuk deretan atom tambahan atau deretan atom yang berkurang yang disebabkan perbedaan bagian-bagian yang saling berdekatan dalam kristal. Dengan adanya dislokasi, maka pertumbuhan atom akan lebih mudah terbentuk. Selain itu sel satuan tambahan akan membentuk tumpukan seperti bentuk anak tangga yang melingkar

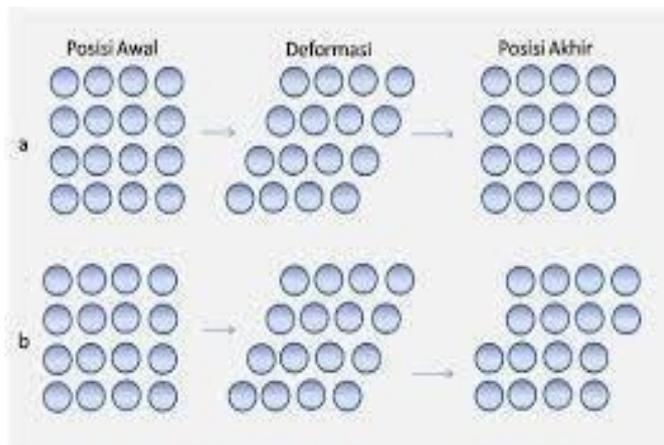
terhadap sumbu saat pertumbuhan berlangsung. Deformasi memicu terjadinya dislokasi. Sebab dengan deformasi akan menyebabkan pergeseran garis maupun pergeseran ulir.

c) Cacat Permukaan

Kecacatan kristal dapat terjadi dalam bentuk dua dimensi dalam bentuk batas. Paling jelas dari cacat bentuk dua dimensi adalah pada permukaan luar. Cacat pada permukaan berbeda dengan cacat pada bagian dalam pada kordinasi atomnya. Hal ini disebabkan bahwa permukaan batas dari struktur kristal dan atom pada permukaan hanya memiliki tetangga pada satu sisi saja. Kondisi ini menyebabkan energi pada atom permukaan lebih tinggi daripada atom bagian dalam, namun ikatan yang dimiliki menjadi kurang kuat. Butir-butir kristal pada permukaan akan dapat mudah diamati dengan mikroskop optik setelah permukaan logam dihaluskan dan dipoles hingga seperti kaca kemudian dilakukan pengetsaan padanya. Di antara butir-butir kristal logam terdapat batas butir yang tampak dalam dua dimensi, meskipun sebenarnya setiap butir itu memiliki ketebalan. Batas butir merupakan regangan plastis dalam suatu logam. Batas butir turut memberikan pengaruh pada logam. Besar daerah batas butir persatuan volume dinyatakan dengan (S_v). Semakin kecil butiran maka akan menjadikan bahan lebih kuat, keras dan lebih memiliki kekuatan tarik. Sedangkan butiran yang lebih besar menjadikan bahan lebih rapuh.

5.3. Deformasi Logam (*Depormation of Metals*)

Perubahan bentuk logam atau disebut deformasi dikelompokkan menjadi dua, yaitu deformasi elastis yang sifatnya sebagai perubahan bentuk sementara dan deformasi plastis yaitu perubahan bentuk suatu logam secara permanen. Deformasi elastis akan kembali pada bentuk awal saat beban dihilangkan. Sedangkan deformasi plastis tidak dapat kembali ke bentuk awal meskipun beban telah dihilangkan.



Gambar 5.8. Susunan butir pada eformasi elastis (a) dan plastis (b)

Sumber: <https://ardra.biz/sain-teknologi/metalurgi/pembentukan-logam-metal>

a) Deformasi Elastis

Pada bab tentang pengujian logam sebelumnya telah dijelaskan, manakala suatu logam ditarik dengan suatu beban, maka ia akan bertambah panjang. Bila beban dilepas dan benda kembali pada bentuk semula, maka itu yang disebut deformasi elastis. Namun jika setelah beban dilepas ternyata logam tidak mampu kembali pada bentuk semula, maka logam tersebut telah mengalami deformasi plastis. Besarnya perpanjangan sel satuan akibat beban tarik atau tekanan ini disebut regangan elastis.

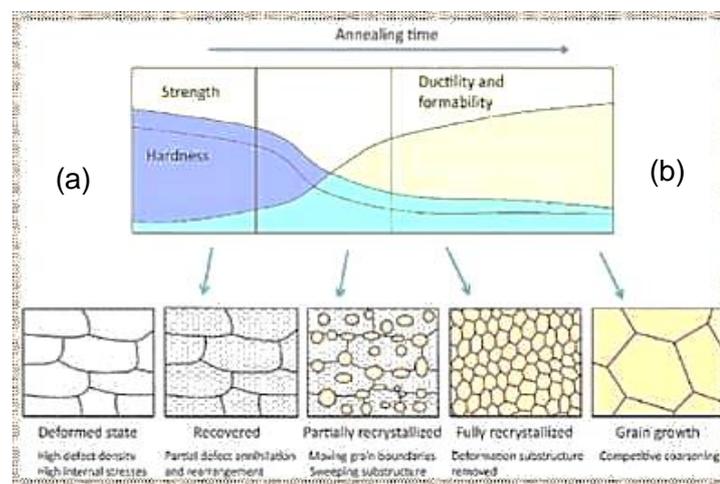
Perbandingan antara tegangan dan regangan ini disebut modulus young.

b) Deformasi Plastis

Deformasi plastis yang memiliki dampak permanen terjadi ketika antar bidang atom dan atau ikatan atom-atomnya pecah pada saat suatu logam mendapatkan beban melebihi modulus youngnya.

5.4. Rekristalisasi Logam (Recrystallization of Metals)

Suatu logam ketika dipanaskan hingga mencapai temperatur difusi maka semua bentuk dislokasi yang ada padanya akan terlepas dan membentuk batasbatas butiran yang baru. Sifatnya akan kembali muda/lunak dan biasa disebut sebagai logam yang telah dianil. Butir yang baru terbentuk memiliki inti pada tempat dalam butir yang telah rusak kemudian tumbuh menjadi kristal baru. Fenomena ini disebut dengan rekristalisasi. Logam yang dianil tersebut menjadi bebas regangan dan memiliki kekuatan serta keuletan yang lebih dibandingkan logam hasil cor.



Gambar 5.9. Deformasi elastis (a) dan plastis (b)

Sumber: <https://www.slideshare.net/preml790/recovery-recrystallization-and-grain-growth>

Tahapan pada rekristalissi terdiri dari pemulihan, rekristalissi dan petumbuhan butir. Sebagaimana diketahui bahwa logam yang dibuat pada pengerjaan dingin mengalami

deformasi dan menyimpan energi di dalamnya (*internal stress*) yang menjadikan logam tidak stabil. Dengan logam dipanaskan kembali hingga temperatur rekristalisasi, maka atom-atomnya akan menyusun dinding-dinding sel. Tahapan ini disebut tahap pemulihan atau poligonisasi. Selanjutnya akan terbentuk kisi-kisi yang baru menggantikan kisi-kisi yang terdeformasi, dan kemudian akan terjadi pertumbuhan butir yang lebih besar dan teratur. Setelah proses ini logam akan menjadi lebih kuat dan ulet, meskipun kekerasannya menurun.

C. Latihan Soal

Jawablah pertanyaan-pertanyaan berikut untuk mereview kedalaman pemahaman Anda tentang materi pada BAB V!

1. Apakah cacat pada logam itu selalu berbuah kerugian? Sebutkan alasannya!
2. Apa yang Anda ketahui tentang larutan padat dalam logam?
3. Jelaskan apa yang dimaksud dengan larutan padat substitusi!
4. Jelaskan apa yang dimaksud dengan larutan interstisi!
5. Jelaskan apa yang dimaksud dengan larutan padat dalam senyawa!
6. Sebutkan dan jelaskan perbedaan antara cacat titik tunggal, cacat schottky dan cacat Frenkel!
7. Jelaskan apa yang dimaksud dengan dislokasi ulir!
8. Apa yang anda ketahui dengan batas butir kristal logam, jelaskan!
9. Jelaskan perbedaan antara deformasi elastis dan deformasi plastis!
10. Sebutkan dan jelaskan tahapan rekristalisasi dalam proses anil logam setelah pengerjaan dingin!

BAB VI
DIAGRAM FASA LOGAM
(PHASE DIAGRAMS OF METALS)

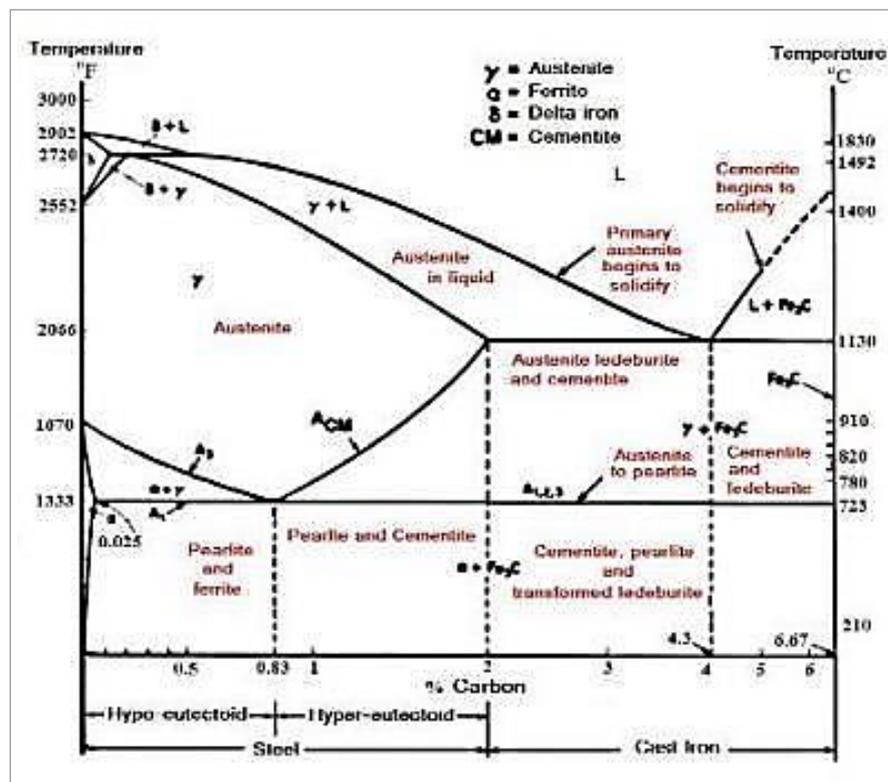
A. Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan materi ini, maka mahasiswa/i diharapkan mampu mengenal, memahami dan menjelaskan dasar-dasar tentang fasa logam melalui diagram fasa logam (*phase diagrams of metals*), terutama diagram fasa logam-baja Fe₃C.

B. Penyajian Materi

6.1. Diagram Fasa Logam-Karbon (*Phase Diagram of Carbon- Metals*)

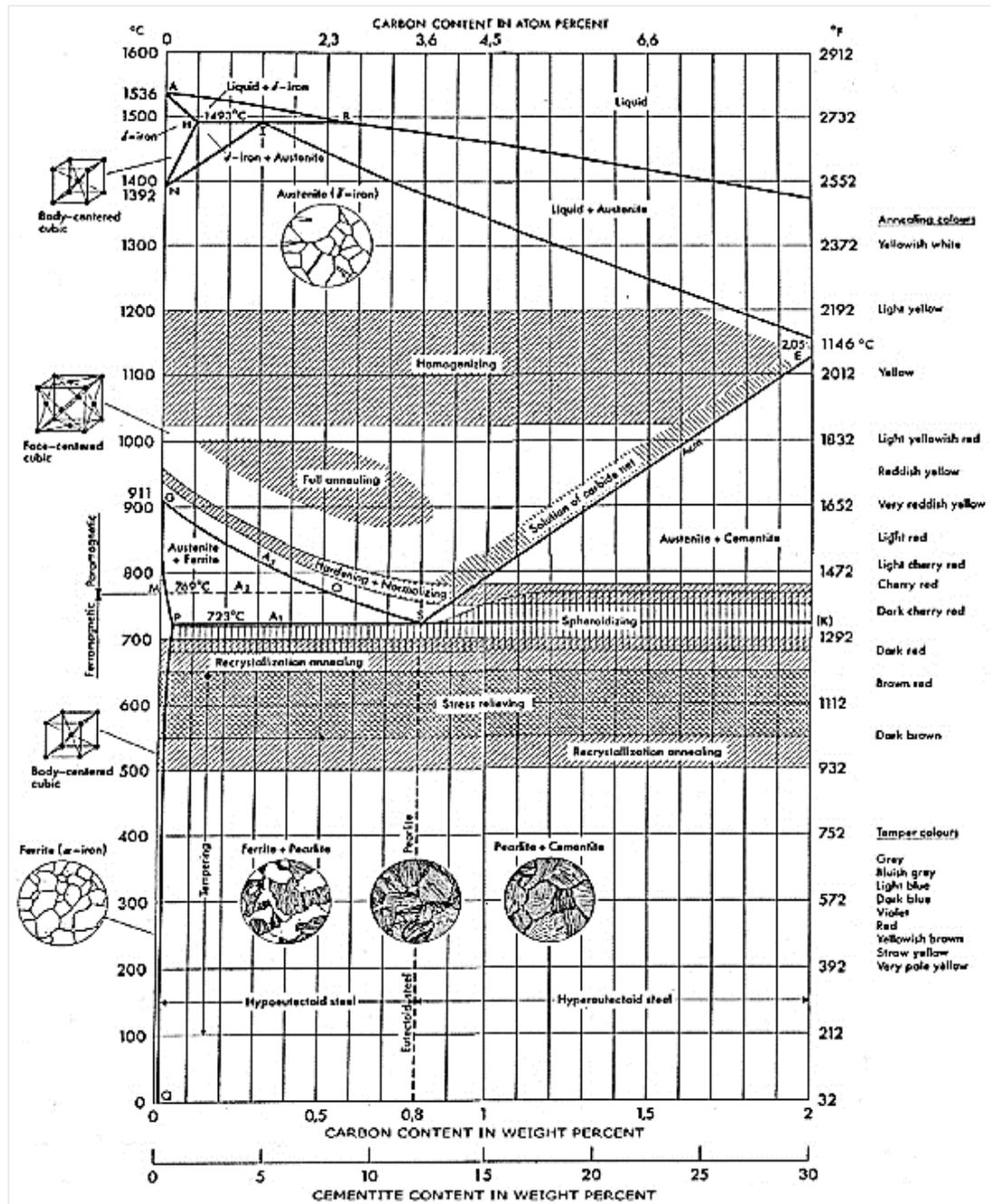
Pengaplikasian baja untuk kontruksi maupun permesinan tentu harus sesuai dengan karakteristik baja yang cukup beragam yang diperoleh melalui proses penambahan unsur paduan serta pemberian *heat treatment* terhadap baja. Sifat mekanik seperti kekerasan, kekuatan tarik, kekenyalan, dan ketangguhan terbentuk oleh struktur mikro. Struktur mikro sendiri dapat dimodifikasi melalui perlakuan panas. Sebagaimana telah dibahas dalam bab awal bahwa baja merupakan paduan logam dengan kadar karbon maksimum 1,5%. Logam yang berkadar karbon lebih dari 1,5% dikategorikan logam tuang (*cast iron*).



Gambar 6.1. Diagram Fe – Fe₃C

Sumber: <https://blog.ub.ac.id/pertamaxxx/2012/03/05/diagram-fe-fe3c/>

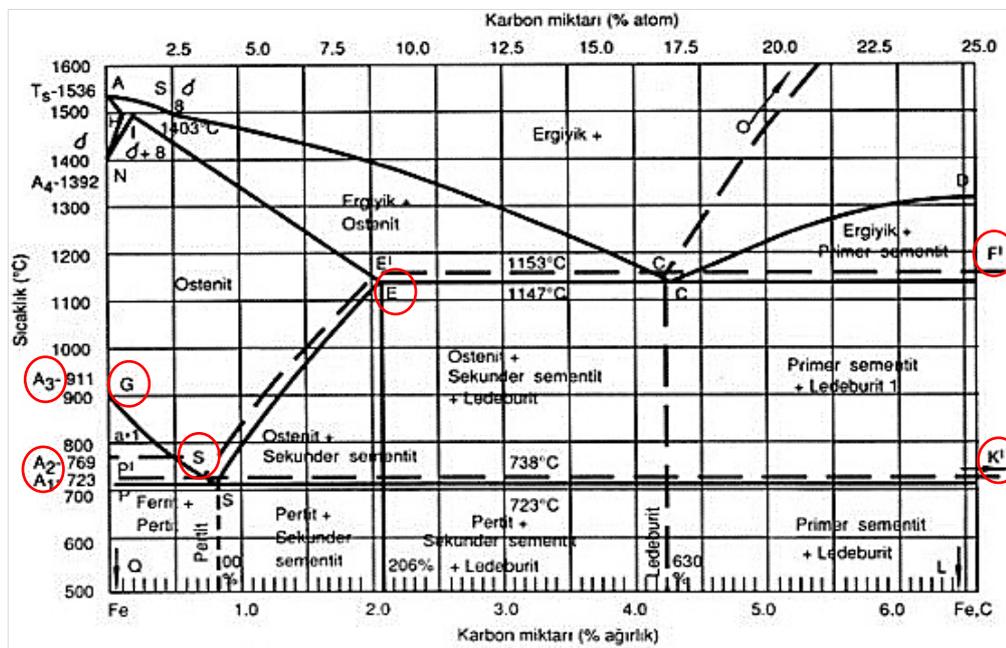
Beberapa jenis baja komersial memiliki karakter yang cukup bervariasi sebagai akibat penambahan unsur-unsur padu. Unsur yang sangat berpengaruh terhadap pembentukan sifat baja adalah karbon (C). Pada paduan logam-karbon (Fe-C) akan bertransformasi arena pengaruh temperatur. Transformasi itu sangat dipengaruhi oleh kadar karbon. Hubungan antara kadar karbon, temperatur dan transformasi ini disebut sebagai diagram fasa. Diagram fasa dari suatu baja karbon menjadi acuan dalam memahami perlakuanperlakuan panas yang akan diterapkan padanya.



Gambar 6.2. Diagram Fasa Fe-Fe₃C

Sumber: <https://www.google.ru/search?q=gambar+diagram+fasa+fe-fe3c+&newwindow>

Diagram fasa sebagai acuan dasar dalam ilmu rekayasa logam (baja dan logam tuang). Dalam diagram ini menunjukkan bahwa sementit (Fe_3C) dengan struktur kristal ortorombik yang 6,65% tertransformasi melalui laju pendinginan cepat, apabila terjadi pendinginan yang lambat maka terjadi karbon (grafit) yang terpisah. Garis putus-putus dalam diagram fasa Fe- Fe_3C (gambar 6.2) menunjukkan keseimbangan logam – karbon. Grafit memiliki kestabilan yang lebih dibandingkan Fe_3C . Kebanyakan baja memiliki kandungan nesi kabit, bukan grafit, maka dari itu pemakaian diagram Fe- Fe_3C menjadi hal yang penting. Austenit menjadi stabil dengan adanya unsur karbon. Karbon dapat larut pada austenit secara maksimum pada $1140^\circ C$ dengan tingkat kelarutan hingga 1,5%. Untuk kelarutan karbon pada ferit bermula pada temperatur $910^\circ C$ pada kadar 0% dan meningkat menjadi 0,025% pada temperatur $523^\circ C$. Setelah itu akan turun tingkat kelarutan karbon pada ferit menjadi 0,008% seiring berlangsungnya pendinginan hingga mencapai temperatur kamar.



Gambar 6.3. Fasa Baja Eutektoid

Sumber: <https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid>

Di dalam gambar 6.3. yang menjelaskan bahwa ketika prosentase karbon bertambah, maka perubahan austenit ke ferit justru turun hingga mencapai titik S kadar karbon mencapai 0,8% pada temperatur $523^\circ C$. Titik di mana prosentase karbon 0,8% pada temperatur $523^\circ C$ ini dikenal sebagai titik eutektoid. Komposisi baja pada titik eutektoid ini sebagai titik acuan dalam mengelompokkan jenis baja. Dengan demikian bisa dikelompokkan tiga jenis baja berdasarkan kadar karbonnya. Baja yang berkadar karbon 0,8% dinamai baja eutektoid,

sementara baja yang berkadar karbon $< 0,8\%$ disebut baja hypoeutectoid. Sedangkan baja berkadar karbon $> 0,8\%$ dinamai baja hypereutektoid. Garis sepanjang titik G hingga S dinamai dengan garis A3, sementara itu garis sepanjang titik P, S, dan K dikatakan sebagai garis A1. Maka disimpulkan bahwa semua titik sepanjang garis GS dan juga SE menuan temperatur pada saat mana perubahan fasa austenit dimulai baik ketika baja dinaikan temperaturnya atau sebaliknya diturunkan temperaturnya.

6.2. Struktur Mikro dan Pengaruhnya Terhadap Sifat Mekanik Logam (*Micristucture and its Effect on Mechanical Properties of Metals*)

Untuk memperoleh sifat dan struktur mikro baja yang sesuai dengan keperluan, maka perlu dilakukan rekayasa melalui perlakuan panas. Proses tersebut meliputi pemanasan dan pendinginan pada logam baja dengan kontrol tertentu. Perbedaan struktur mikro baja akan tampak jelas manakala permukaan baja diamati dengan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran tertentu. Selain prosentase komposisi kimia baja, perlakuan panas yang terapkan pada baja itu sangat mempengaruhi timbulnya perbedaan jenis-jenis struktur mikro tersebut. Ada beberapa struktur mikro yang terbentuk pada baja yang telah umum diketahui, diantaranya adalah sementit, bainit, martensit, perlit, ferit, dan austenit. Sebagai penjelasannya adalah sebagai berikut:

a. Austenit

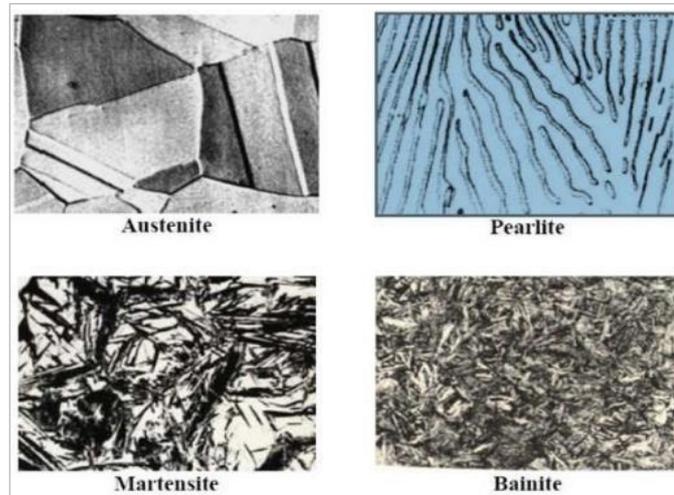
Austenit merupakan larutan padat karbon bebas dan logam dalam logam gamma yang berstruktur *face centered cubic* (FCC). Pada pemanasan baja, setelah temperatur kritis atas, struktur sepenuhnya terbentuk menjadi austenit dengan sifat keras, ulet (*ductile*) dan tidak bersifat magnetik. Karbon dengan jumlah banyak dapat terlarut dalam austenit. Kondisi tersebut berlangsung di antara rentang kritis atau transfer pada saat pemanasan/pendinginan baja. Austenit terjadi manakala baja mencapai temperatur 1130°C dengan kadar karbon $1,8\%$. Ketika pendinginan berlangsung di bawah 723°C , austenit bertransformasi ke perlit dan ferit.

Sifat lain baja austenitik ialah sulit ditingkatkan kekerasannya melalui *heat treatment* biasa.

b. Ferit

Struktur ini memiliki bentuk *body centered cubic* (BCC) memiliki kadar karbon yang sangat sedikit $0,025\%$ (atau tidak ada). Nama ferit dilabelkan pada kristal logam murni dengan karakteristik lunak dan ulet. Pendinginan austenit yang berlangsung lambat lambat dari austenit baja *low carbon* di bawah suhu kritis (titik A3) atau pada temperatur 523°C bertransformasi membentuk ferit. Ferit tidak dapat menjadi keras apabila didinginkan dengan

cepat. Kekerasan ferit hanya 50-100BHN, sehingga digolongkan lunak, namun konduktifitas yang sangat baik.



Gambar 64. Contoh bentuk struktur mikro

Sumber: [//blog.ub.ac.id/guondol](http://blog.ub.ac.id/guondol)

c. Perlit

Struktur ini merupakan gabungan eutektoid dari ferit dan sementit. Struktur ini terbentuk pada baja *low carbon* ($< 0,8\%$) berupa campuran mekanik ferit dan sementit. Perlit bersifat kuat, keras dan ulet, sebaliknya ferit lemah, lunak dan ulet. Perlit tampak seperti lapisan-lapisan (lamel). Ketika perlit diperbesar dengan pengamatan mikroskop, akan tampak permukaan berbentuk *pearl* oleh sebab itulah struktur ini dinamai perlit. Baja dengan sifat keras memiliki gabungan perlit- sementit, sedangkan baja dengan sifat lunak merupakan gabungan ferit-perlit.

d. Martensit

Struktur ini berupa larutan padat karbon lewat jenuh pada logam α yang terdistorsi latis-latis sel satuannya. Bentuk martensit mirip daun bambu atau jarum. Sifat martensit sangat keras. Martensit diperoleh dengan cara mendinginkan baja pada temperatur austenisasi dengan pendinginan cepat melampaui laju pendinginan kritisnya. Martensit memiliki sel satuan *body centered tetragonal* (BCT). Pada proses pembentukannya, atom karbon menggeser latis kubus menjadi bentuk tetragonal. Pembentukan martensit tidak tergantung dengan waktu. Titik di mana martensit mulai terbentuk disebut titik martensit start (Ms), sedangkan titik di mana pembentukan martensit berakhir disebut martensit finish (Mf). Pembentukan martensit justru dipengaruhi oleh cara mengaustenisasi baja dan komposisi kimia baja, terutama karbon. Semakin tinggi kandungan karbon pada baja seakin menjadikan

titik awal dan akhir pembentukan martensitnya akan semakin rendah. Kadar karbon baja yang melebihi 0,5% akan menjadikan austenit tidak seluruhnya bertransformasi menjadi martensit yang disebut dengan austenit sisa. Faktor lain yang menjadikan turunnya titik Ms dan Mf adalah prosentase unsur padu baja, semisal Mo, Cr, Ni, Si dan Mn. Halus dan kasarnya butir austenit akan berpengaruh pada kehalusan butir martensit. Bersama dengan pembentukan martensit akan timbul kenaikan volume spesifik yang menimbulkan ketegangan dan memicu adanya distorsi atau keretakan. Kekerasan martensit mampu mencapai 60HRC.

e. Bainit

Fasa bainit ditemukan oleh E.C. Bainit. Fasa ini tidak stabil yang merupakan transformasi austenit di bawah transformasi austenit ke perlit namun di atas transformasi austenit ke martensit. Kekerasan bainit hanya berkisar 45-50 HRC saja. Bainit terbagi dua, jika terbentuk pada daerah fasa dengan temperatur lebih tinggi disebut upper bainit dengan struktur yang lebih halus dan mirip perlit, dan jika terbentuknya pada daerah fasa bertemperatur lebih rendah disebut lower bainit dan berbentuk mirip martensit temper.

f. Sementit

Sementit merupakan persenyawaan kimia antara karbon dan logam yang disebut sebagai logam karbida (Fe_3C). Logam tuang dengan kadar karbon 6,67% mempunyai struktur sementit tinggi. Sedangkan sementit bebas, hampir ada di setiap baja dengan kadar karbon >0,83%. Jumlah sementit berbanding lurus dengan kadar karbon. Hal ini bisa dilihat pada diagram fasa logam-karbon. Sementit dapat meningkatkan kekerasan serta menjadikan rapuh pada logam cor, sekaligus menurunkan kekuatan tarikannya. Sementit memiliki sifat magnetik ketika di bawah temperatur 200°C.

g. Karbida

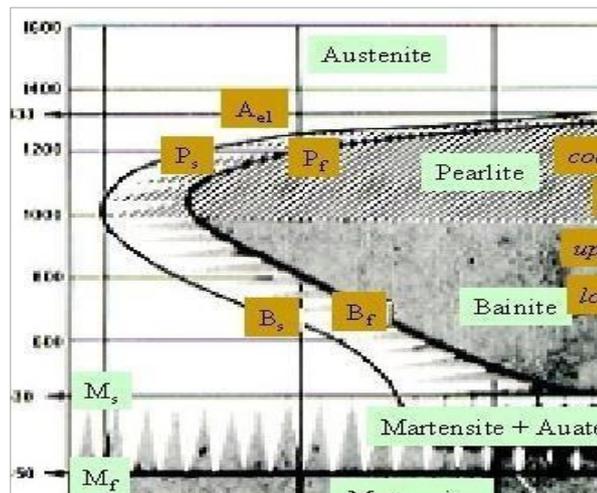
Unsur padu logam semisal C, Mg, Cr, W, Mo, dan V biasanya dicampurkan untuk membuat baja-baja perkakas dengan tujuan meningkatkan ketahanan baja terhadap temperatur yang tinggi dan juga ketahanan aus. Unsur padu tersebut mendorong terbentuknya karbida.

6.3. Diagram TTT Logam (*Time -Temperature – Transformation of Metals*)

Karakter mekanik baja dapat direkayasa agar sesuai dengan kondisi kerja. Untuk itu perlu dilakukan perlakuan-perlakuan (*treatment*) selain mengatur komposisi paduannya. *Treatment* yang dilakukan untuk merekayasa sifat mekanik adalah dengan perlakuan panas secara optimum yang dapat merubah struktur logam dari struktur yang awal menjadi struktur yang baru. Tahap perubahan baja dapat dijelaskan dengan diagram fasa. Melalui diagram fasa FeC kondisi transformasi bisa diperkirakan, walaupun pada saat kondisi tidak setimbang

diagram fasa tidak sepenuhnya bisa dimanfaatkan. Maka agar lebih mudah dalam memahami setiap kondisi perubahan akan lebih baik jika menggunakan diagram *Time-Temperature-Transformation* atau TTT, sebagian menyebut dengan diagram S atau diagram C. Pada diagram ini akan bisa dipahami hubungan antara perubahan austenit terhadap waktu dan temperatur ketika austenit didinginkan menuju temperatur kamar.

Pada diagram TTT, garis datar menunjukkan waktu dalam skala logaritmik, sementara garis tegak sebagai indikator temperatur. Struktur mikro dari suatu spesimen baja yang dipanaskan hingga temperatur austenisasi yang kemudian didinginkan hingga waktu tertentu hingga seluruh struktur austenisasi bertransformasi dapat dipelajari dan dikelompokkan melalui diagram TTT. Sebagaimana diketahui dalam bab sebelumnya bahwa misalkan spesimen baja dipanaskan hingga mencapai austenisasi dan didinginkan, maka pada temperatur 700°C akan terbentuk perlit kasar, pada temperatur 550°C terbentuk perlit halus. Semakin ke bawah sekitar 450°C terbentuk upper bainit dan ke bawah lagi $\pm 250^\circ\text{C}$ terbentuk lower bainit. Awal transformasi dari austenit dinyatakan dengan garis B dan E merupakan waktu akhir transformasi austenit. Untuk memperoleh martensit, maka pendinginan harus berlangsung lebih cepat daripada garis B, dan itu hanya bisa dicapai dengan pencelupan ke dalam cairan (*quenching*).



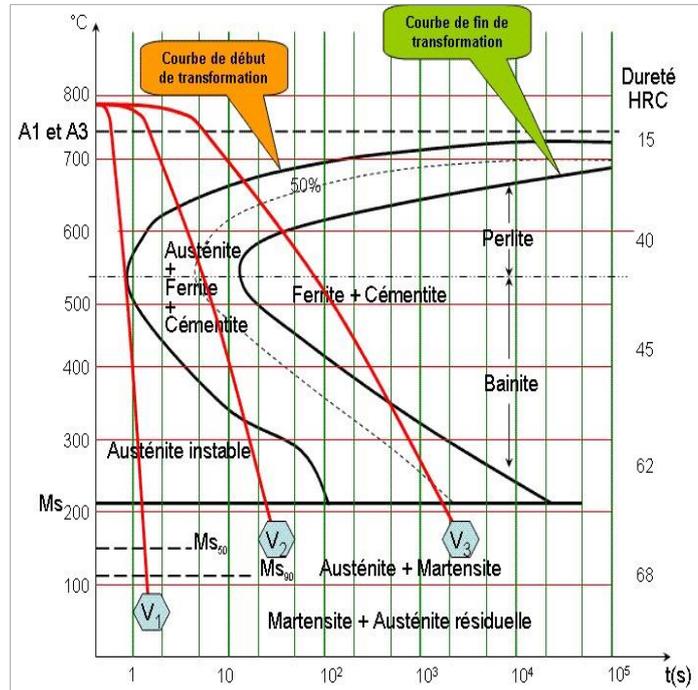
Gambar 65. Diagram Time-Temperature-Transformation

Sumber: <https://slidetodoc.com/perlakuan-panas-logam-ttt-cct-diagramannealing>

6.4. Diagram CCT Logam (*Cooling - Continuous – Transformation of Metals*)

Dalam kondisi aktual heat treatment transformasi baja berlangsung selama kondisi pendinginan secara terus menerus (*Continuous Cooling*). Tahap tersebut secara teoritis bisa dijabarkan melalui diagram *Continuous-CoolingTransformation* atau CCT. Dalam kurva ini ditunjukkan garis tegak sebagai penunjuk temperatur, sementara garis datar adalah waktu.

Misalkan beberapa spesimen baja dipanaskan hingga temperatur austenisasi kemudian didinginkan dengan berbagai cara seperti ada yang didinginkan perlahan dalam tungku pemanasnya (*annealing*), atau didinginkan di udara (*normalizing*), atau didinginkan dengan oli atau air (*hardening*), maka proses *annealing* ditunjukkan dengan garis miring yang paling landai (V3), di mana laju pendinginannya paling lambat.



Gambar 66. Diagram TTT-CCT

Sumber: <https://blog.ub.ac.id/salsabilavelina/2012/03/09/diagram-ttt-timetemperature-transformation/>

Normalizing ditunjukkan dengan garis miring yang lebih curam (V2) dari garis *annealing*, di mana laju pendinginannya lebih cepat dari *annealing*. Demikian seterusnya hingga garis yang paling curam yang menunjukkan laju pendinginan yang lebih cepat seperti pencelupan dengan oli atau air (V1). Perpotongan garis miring dengan kurva B menunjukkan awal pendinginan, dan perpotongan garis miring dengan kurva E menunjukkan akhir pendinginan. Jarak antara keduanya merupakan waktu yang diperlukan selama pendinginan. Martensit diperoleh dengan laju pendinginan yang lebih cepat daripada pendinginan kritikal. Dalam diagram CCT, garis miring untuk membentuk martensit tidak sampai bersentuhan dengan kurva B. awal dan akhir pembentukan martensit ditunjukkan dengan garis datar Ms hingga Ms₂₀₀.

C. Latihan Soal

1. Coba Anda jelaskan manfaat dari diagram fasa logam-baja
2. Bagaimanakah cara untuk menentukan temperatur austenisasi suatu baja karbon
3. Berdasarkan kadar karbon baja terbagi menjadi hypoeutectoid, eutectoid dan hypereutectoid
4. Bagaimanakah membedakan antara logam tuang dan baja berdasarkan kadar karbonnya?
5. Dalam diagram fasa logam -baja dikenal titik hentian A1, A2, dan A3. Pada temperatur berapakah titik-titik perhentian itu ada?
6. Jelaskan apa yang dimaksud struktur mikro austenit, ferit, perlit, bainit, dan martensit
7. Mengapa martensit harus dibentuk dengan dengan laju pendinginan cepat melebihi titik kritisnya?
8. Media pendingin apa yang digunakan selama proses normalizing
9. Media pendingin apakah yang digunakan untuk mengquench baja yang diaustenisasi agar membentuk martensit?
10. Menjelaskan tentang apakah diagram TTT dan CCT

BAB VII

PERLAKUAN PANAS LOGAM

(*HEAT TREATMENT OF METALS*)

A. Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan materi ini, maka mahasiswa diharapkan mampu mengenal, memahami, menjelaskan, dan menentukan perlakuan panas (*heat treatment*) yang sesuai untuk merekayasa sifat logam secara menyeluruh.

B. Penyajian Materi

Seperti telah dibahas dalam pertemuan sebelumnya, bahwa salah satu faktor yang dapat merubah sifat mekanik logam khususnya logam-baja adalah dengan memberikan perlakuan panas. Perlakuan panas dilakukan dengan memanaskan logam hingga mencapai temperatur tertentu serta kecepatan pemanasan yang tertentu. Selanjutnya agar logam homogen pada seluruh bagiannya, maka dilakukan penahanan logam pada temperatur tertentu tersebut dalam waktu yang ditentukan. Tahapan selanjutnya adalah mendinginkan logam dengan media pendingin. Melalui perlakuan panas akan dapat merubah kekerasan logam, menghilangkan tegangan dalam, menghaluskan ukuran butir. Sebagai acuan dalam heat treatment adalah diagram fasa logam. Pada logam-baja kadar karbon menjadi panduan untuk menentukan temperatur pemanasan. Hasil akhir dari perlakuan panas juga dipengaruhi oleh komposisi kimia yang lain selain karbon. Berikut adalah beberapa perlakuan panas yang umum diterapkan pada logam-baja.

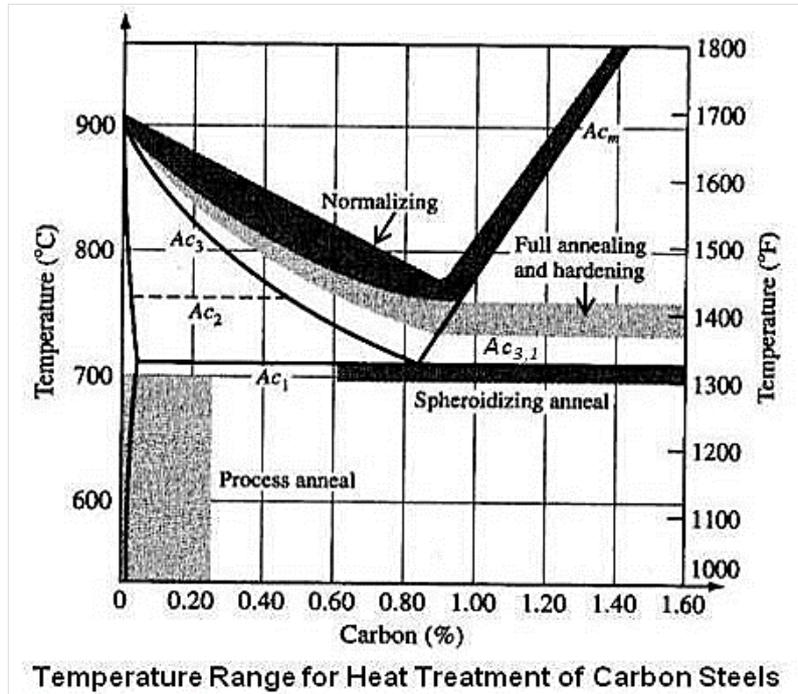
7.1. Annealing

Annealing adalah treatment terhadap baja yang dilakukan dengan tujuan memperbaiki kesudian logam untuk dimesin dan ditempa, menghaluskan butiran, menghilangkan tegangan sisa logam, menurunkan tingkat kekerasan serta memperbaiki sifat fisis yang lain. Proses anil dilakukan dengan memanaskan logam hingga mencapai temperatur austenisasi kemudian dipertahankan hingga waktu tertentu agar homogen. Setelah itu dibiarkan dingin secara perlahan di dalam tungku pemanas tanpa terkena udara luar. Ada beberapa cara annealing sesuai tujuan yang ingin dicapai, antara lain:

- a. *Full Annealing*, cara ini dilakukan dengan tujuan menghaluskan butir sehingga logam lebih tangguh dan memiliki kesudian mesin yang baik. Annealing dilakukan dengan memanaskan baja karbon <0,8% hingga mencapai austenisasi, $\pm 50^{\circ}\text{C}$ atas garis A_3

diagram fasa, dan untuk baja karbon $>0,8\%$ di atas temperatur A_1 , kemudian dibiarkan dingin secara lambat dalam tungku.

- b. *Spheroidized Annealing*, proses ini dilakukan juga untuk meningkatkan kesudian mesin dan kesudian bentuk logam. Caranya adalah dengan memanaskan logam baja di bawah atau di atas dari temperatur daerah A_1 diagram fasa, mempertahankan pada temperatur tersebut dalam waktu yang ditentukan, kemudian membiarkannya dingin secara lambat dalam tungku pemanas tersebut.



Gambar 7.1. Diagram Suhu *Spheroidized Annealing*

- c. *Isothermal Annealing*, tujuan utamanya adalah untuk menurunkan kekerasan baja agar lebih siap diproses dengan mesin. Prosesnya sama dengan proses full annealing kemudian didinginkan dengan lebih cepat hingga mencapai temperatur di bawah A_1 , yaitu daerah perlit kemudian dibiarkan dingin secara lambat.
- d. *Homogenisasi*, Proses ini dilakukan untuk menyeragamkan struktur baja-baja paduan berupa ingot yang baru saja dituang. Homogenisasi dilakukan dengan memanaskan pada rentang temperatur 850°C - 1200°C , kemudian didinginkan menuju 800°C - 850°C dan didinginkan di udara. Tahapan selanjutnya dilakukan dengan proses anil seperti biasa.
- e. *Stress Relieving*, pada logam bisa terjadi tegangan dalam yang memicu distorsi atau keretakan. Tegangan ini bisa muncul pada logam akibat proses pemesinan. Tegangan juga bisa muncul akibat proses pembentukan yang dialami logam, seperti tarikan atau tekukan.

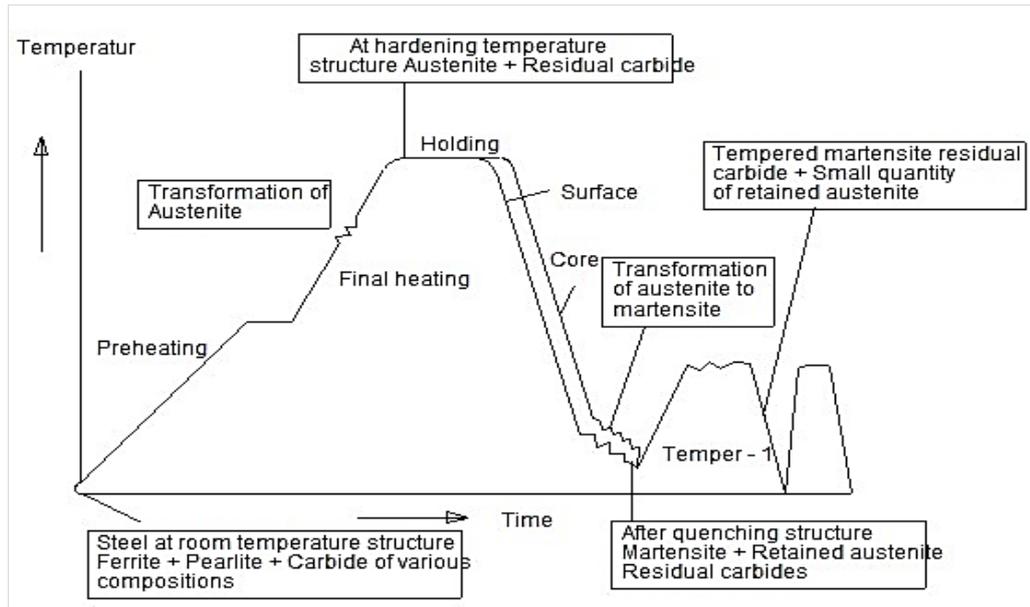
Perlakuan panas juga menyebabkan tegangan, di mana benda panas didinginkan cepat yang menyebabkannya mengalami perubahan volume spesifik sehingga menjadikan ketegangan logam. Penyebab lain yang dapat menimbulkan ketegangan adalah pengecoran, di mana proses laju pendinginan bagian dalam dan luar mengalami perbedaan. Pengelasan dan penyolderan juga dapat menimbulkan tegangan pada daerah HAZ dan logam yang di las karena munculnya pemuaihan dan pengkerutan. Stress relieving dilakukan dengan memanaskan logam baja pada retang antara 500°C-700°C (di bawah A1 pada diagram fasa) yang pada temperatur itu baja menjadi ulet. Seperti proses annealing, baja kemudian didinginkan secara lambat dalam tungku pemanas. Atau didinginkan dalam tungku hingga temperatur 300°C kemudian didinginkan di udara.

7.2. Normalizing

Normalizing adalah perlakuan panas yang merupakan proses penormalan yang diberikan pada produk tempa panas, cor dan produk yang mengalami pemanasan berlebih. Tujuan perlakuan ini untuk meningkatkan kesudian mesin logam, menghilangkan tegangan sisa, menghaluskan ukuran butir yang semula kasar karena proses sebelumnya, serta memperbaiki sifat mekanik logam baja. Proses normalizing dikerjakan melalui memanaskan logam sampai pada temperatur austenisasi dan dipertahankan pada temperatur tersebut sampai beberapa waktu (*holding time*) kemudian didinginkan di udara. Temperatur austenisasi ditentukan pada sedikit di atas temperatur A3 atau Acm pada diagram fasa.

7.3. Hardening

Hardening, perlakuan panas ini dilakukan pada komponen berlogam baja dengan tujuan untuk menambah nilai kekerasan agar bisa lebih tahan aus dan meningkat kekuatan tariknya. Hardening dilakukan dengan memanaskan logam hingga mencapai temperatur austenisasi dan menahannya selama waktu tertentu agar homogen dan kemudian dicelup pada media pendingin agar mengalami laju pendinginan yang tinggi. Dari proses ini akan terbentuk struktur martensit yang berstruktur body centered tetragonal akibat tergesernya atomatom oleh karbon. Proses hardening diikuti tempering agar tegangan dalam yang ada akibat hardening menjadi berkurang.



Gambar 7.2. Kurva Perlakuan Panas

Sumber: <http://logamunib.blogspot.com/2014/10/perlakuan-panas.html>

a. Temperatur Pemanasan dalam *hardening*

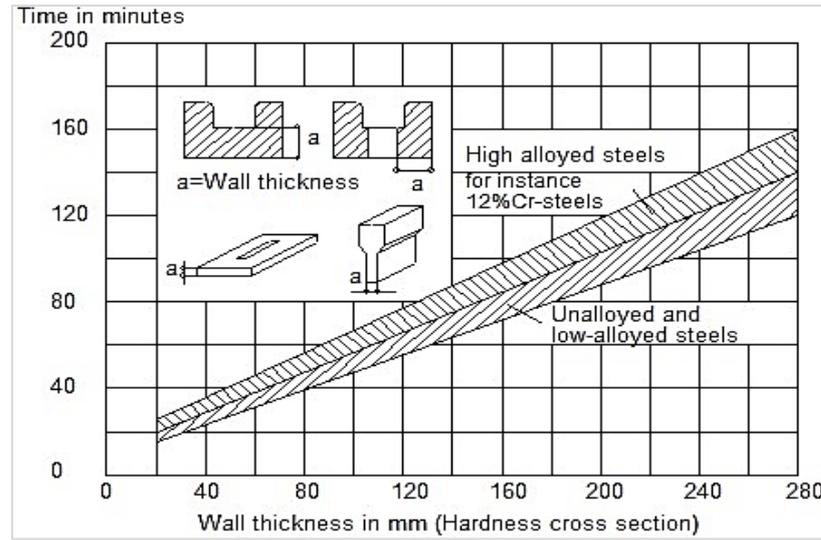
Pemanasan logam hingga mencapai temperatur austenisasi penting untuk melarutkan sementit dalam austenit. Temperatur austenit ada sekitar 20°C-50°C di atas garis A3 untuk baja karbon rendah, dan 30°C-50°C di atas garis A1.3 untuk baja karbon tinggi. Jika kurang dari temperatur austenisasi, maka tidak ada perubahan struktur awal baja. Martensit yang terbentuk tidak maksimal dan masih banyak ferit tersisa, sehingga baja tidak bertambah ketangguhannya. Sebaliknya apabila pemanasan terlalu tinggi hingga mencapai daerah E pada digram fasa, maka akan menjadikan ukuran butir austenit akan meningkat, dan bila diquench akan mudah retak dan rapuh.

b. Tahapan Sebelum *Quenching*

Sebelum benda kerja dipanaskan, maka perlu diperhatikan beberapa hal, antara lain pembersihan permukaan benda dari kotoran dan oli. Lubang2 yang ada pada benda ditutupi dengan tanah liat agar ketika diquench nanti tidak terjadi pengerasan lokal pada lubang. Benda kerja dengan ukuran yang besar dan bentuk yang rumit sebaiknya diberikan pemanasan awal sekitar 500C-600C, setelah itu ditingkakan temperturnya hingga temperatur austenisasinya. Tujuannya agar struktur logam ketika dipanaskan bisa seragam antara bagian luar dan dalam.

c. Lama Waktu Austenisasi

Lama waktu pemanasan kadang tidak sama karena adanya beberapa faktor yang harus dipertimbangkan, seperti tipe tungku pemanas, jenis baja, serta dimensinya. Lama waktu mempertahankan logam pada temperatur austenisasi ini disebut *holding time*. Pada gambar 7.2 berikut memberikan petunjuk lamanya waktu untuk memanaskan baja. Yang perlu diperhatikan adalah jangan sampai pemanasan menyebabkan pertumbuhan butir karena waktu pemanasannya yang lama.

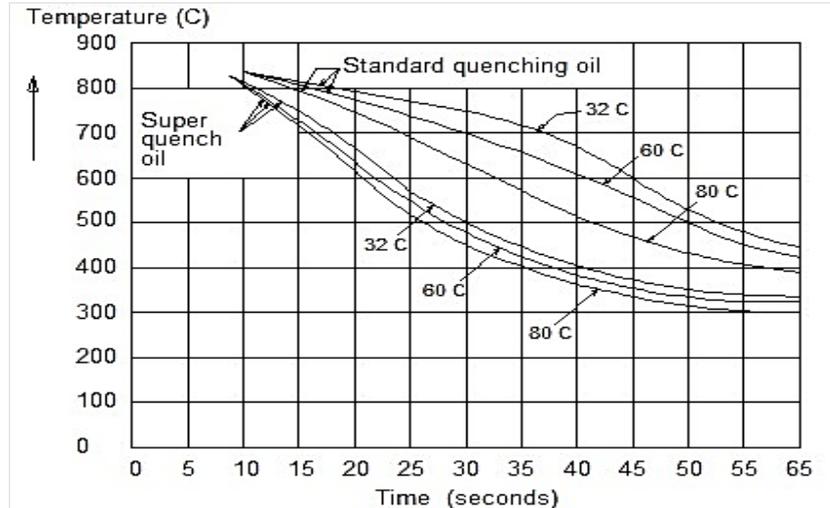


Gambar 7.3. Grafik Perbandingan Dimensi dan Waktu Pemanasan Benda Kerja

Sumber: http://logamunib.blogspot.com/2014_10_16_archive.html

d. Media Pendingin untuk *Quenching*.

Media pendingin harus menjamin terjadi laju pendinginan cepat sehingga terbentuk struktur martensit. Namun perlu diperhatikan juga bahwa efek pendinginan tersebut jangan sampai menimbulkan distorsi yang berakibat keretakan, apalagi quenching biasanya dilakukan pada benda kerja dalam tahap akhir pengerjaan. Oli sangat disarankan digunakan sebagai media quenching untuk baja paduan, seangkan air disarankan untuk baja karbon. Pembentukan lapisan uap/lapisan film pada oli lebih mudah dikontrol dibandingkan air. Akan lebih baik jika oli dipanaskan hingga 100°C supaya lebih encer dan mampu meningkat laju pendinginannya.



Gambar 7.4. Temperatur Oli dan Waktu Pendinginan

Sumber: http://logamunib.blogspot.com/2014_10_16_archive.html

e. Pembentukan austenit sisa

Pada saat quenching terjadi perubahan austenit menjadi martensit dengan syarat pendinginan berlangsung cepat menuju temperatur kamar. Namun manakala terjadi perlambatan pendinginan akan ada austenit yang tidak bertransformasi menjadi martensit yang disebut sebagai austenit sisa. Kadar karbon turut berpengaruh dalam pembentukan austenit sisa, semakain tinggi karbon maka akan menurunkan titik awal terbentuk martensit sehingga semakin memperbanyak austenit sisa. Temperatur austenisasi yang terlalu tinggi juga menurunkan titik awal terbentuknya martensit yang berakibat bertambahnya austenit sisa.

7.4. Tempering

Proses temper atau memudakan kembali baja adalah salah satu perlakuan panas untuk memperbaiki kualitas baja agar lebih siap pakai. Tegangan sisa pada baja akibat pengerasan dapat diturunkan melalui laku temper. Dengan temper maka akan meningkatkan ketangguhan baja, di mana kekerasannya sedikit diturunkan dan keuletannya ditingkatkan. Proses temper dilakukan dengan cara memanaskan baja di bawah daerah A1 diagram fasa kemudian didinginkan diudara. Ada beberapa perubahan terjadi selama tempering berlangsung. Temper dengan pemanasan 80°C -200°C hanya akan menurunkan tegangan baja tanpa menurunkan kekerasannya. Pada tahap ini terjadi perubahan struktur tetragonal martensit karena keluarnya karbon menjadi kubik ferit. Temper dengan pemanasan antara 200°C-300°C terjadi perubahan dari austenit sisa menjadi struktur mirip bainit diikuti meningkatnya volume baja. Ketika temperatur temper ditingkatkan antara 300°C - 400°C, maka volume baja turun diikuti

pembentukan sementit dari karbida. Pada tahap ini sudah mulai terjadi penurunan kekerasan selain ketegangan baja. Ketika temperatur temper di atas 400°C bahkan mendekati 700°C kekerasan baja akan turun jauh karena *pada saat itu terjadi pertumbuhan dan proses sperodisasi dari fasa sementit.*

7.5. Austempering

Aus tempering merupakan metode yang dilakukan untuk membentuk ketangguhan dan keuletan baja. Proses austempering dilakukan dengan memanaskan baja hingga mencapai temperatur austenisasi dan selanjutnya dicelup ke dalam garam cair yang panasnya mencapai sedikit di atas temperatur martensit start (Ms) atau sekitar 250°C sampai 270°C. Garam tersebut lazim disebut *salt bath* yang merupakan campuran dari nitrat dan nitrit. Garam tersebut dapat digunakan pada batas temperatur panas 150°C sampai 500°C. Selanjutnya baja ditahan dalam dalam cairan garam tersebut selama waktu tertentu dengan maksud semua struktur austenit berubah menjadi struktur bainit. Tahap selanjutnya baja didinginkan di udara. Kekerasan bainit yang diperoleh bisa menyamai kekerasan martensit yang ditemper dengan temperatur temper yang sama. Perlu diingat bahwa pemanasan salt bath di atas 500°C dapat menimbulkan pitting pada permukaan baja, kedua pemanasan yang terlalu tinggi dapat menimbulkan ledakan. Untuk itu batas pemanasannya sapa diperhatikan.

Satu lagi cara untuk menghindarkan distorsi dan keretakan pada baja yang diquench adalah dengan cara menunda sedikit waktu pencelupan atau yang disebut *delay quenching*. Cara ini dilakukan dengan mengeluarkan baja dari tungku pemanas setelah mencapai temperatur austenisasi namun tidak langsung diquench, melainkan diberikan jeda sejenak untuk sedikit menurunkan panasnya. Quench pada temperatur ini diharapkan dapat mengurangi resiko distorsi. Metode ini diterapkan untuk baja yang dikeraskan pada bagian permukaannya, baja *hot worked* dan juga pada *high speed tool* (HSS).

C. Latihan Soal

1. Jelaskan apa yang Anda ketahui tentang perlakuan panas (*heat treatment*) pada baja!
2. Jelaskan apa tujuan dilakukan heat treatment pada baja!
3. Faktor apa sajakah yang mempengaruhi sifat mekanik baja selain *heat treatment*?
4. Apa yang menjadi parameter pemanasan baja pada proses austenisasi?
5. Apa tujuan dari austenisasi dan holding time pada baja yang diberikan perlakuan panas?

6. Apa yang Anda ketahui dengan annealing, sebutkan jenis-jenisnya!
7. Berapakah temperatur pemanasan dalam *annealing*?
8. Jelaskan apa yang dimaksud dengan *haedening*!
9. Jelaskan tujuan dari tempering!
10. Apa tujuan dari delay *quenching*?

BAB VIII
PERLAKUAN PERMUKAAN LOGAM
(*SUFACE TEATMENT OF METALS*)

A. Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan materi pada pertemuan 10 ini, maka mahasiswa diharapkan mampu mengenal, memahami, menjelaskan dan menentukan perlakuan permukaan (*surface treatment of metals*) yang sesuai untuk merekayasa sifat pada permukaan logam.

B. Penyajian Materi

Perlakuan permukaan logam (*surface treatment of metals*) dilakukan dengan tujuan merubah sifat mekanik baja hanya pada daerah permukaan saja. Berbeda dengan perlakuan panas (*heat treatment*) yang telah dibahas sebelumnya yang bertujuan merubah sifat logam baja secara menyeluruh dari bagian luar hingga bagian dalam logam baja. Surface treatment bertujuan untuk memperbaiki sifat logam pada bagian luar, misalkan untuk meningkatkan kekerasan dan ketahanan terhadap aus. Perlakuan permukaan ini dapat juga berbentuk pelapisan permukaan baja (*coating*) dengan bahan yang memiliki tingkat kekerasan lebih, atau pelapisan dengan lapisan untuk meningkatkan permukaan logam ketahanan terhadap korosi. Tujuan lain dari perlakuan permukaan yang tidak kalah penting adalah untuk memperbaiki kondisi luar logam agar lebih memiliki nilai estetika. Pada pembahasan kali ini akan dibahas hanya tentang metode merubah komposisi kimia dan struktur mikro permukaan logam baja yang meliputi karburasi, nitridasi, karbonitridasi, dan metode merubah struktur mikro permukaan logam baja tanpa merubah komposisi kimia yang terdiri dari induksi hardening dan *flame hardening* (Elisabete A. 2000).

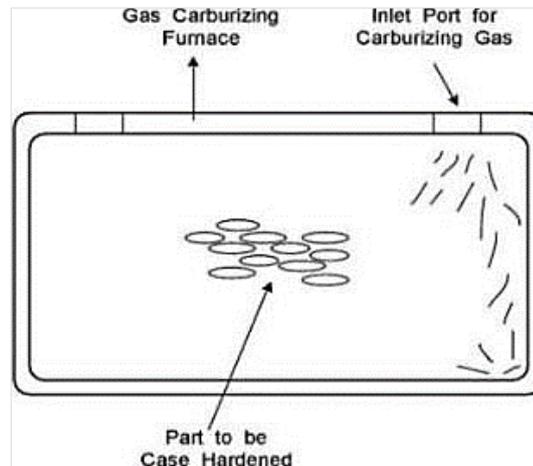
8.1. Carburizing

Perlakuan ini diberikan pada baja dengan tujuan meningkatkan kekerasan baja pada bagian permukaan, yaitu dengan menambahkan lapisan karbon di permukaan baja. Tahapan dari karburasi adalah dengan memanaskan baja hingga mencapai temperatur sedikit di atas daerah A1 (daerah austenisasi) pada diagram fasa dalam tungku atau pemanas yang kaya akan gas karbon (CO). Dengan demikian karbon tersebut akan bereaksi dengan logam. Reaksi tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:



Karbon yang diberi notasi Fe_(c) akan larut pada struktur austenit yang terbentuk oleh pemanasan di permukaan baja. Karbon akan berdifusi bersama austenit hingga mencapai

kedalaman tertentu saja, tidak sampai bagian dalam baja. Setelah itu baja yang telah dipanaskan tadi dicelupkan ke dalam air dengan laju pendinginan cepat. Secara teoritis yang telah kita bahas sebelumnya, dengan pemanasan mencapai austenisasi dan diikuti pendinginan cepat tersebut pada bagian luar akan terbentuk struktur perlit dan uga struktur sementit yang memiliki sifat keras. Pada daerah batas di mana karbon mampu berdifusi terbentuk struktur perlit, dan pada bagian dalam di mana karbon tidak mampu menjangkau untuk berdifusi masih berstruktur perlit dan ferit yang tentu kekerasannya lebih rendah. Dan jika perlu, perlakuan panas lain seperti annealing bisa diterapkan untuk memperbaiki butir baja agar lebih halus. Misalkan dilakukan *annealing*. Masalahnya ketika pencelupan cepat dari temperatur austenisasi ke air dikhawatirkan membentuk butiran yang kasar yang tentu menyebabkan baja menjadi rapuh dan getas.



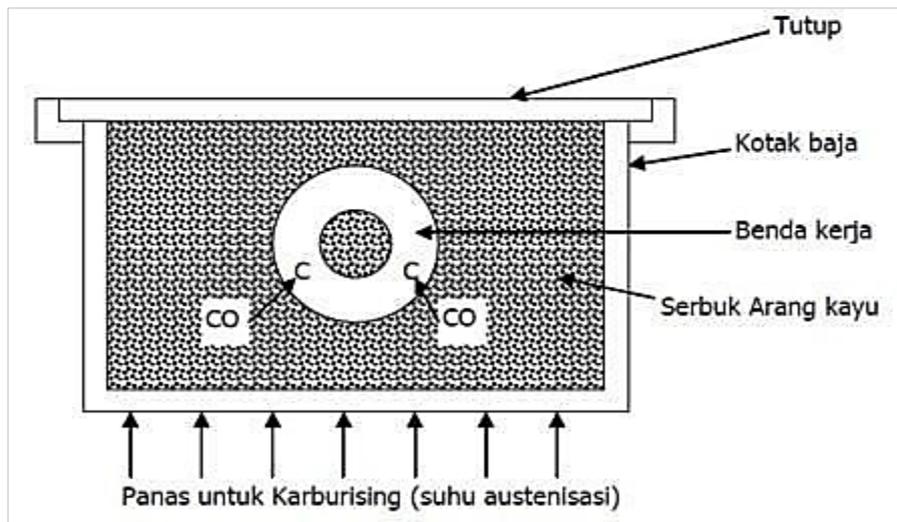
Gambar 8.1. *Gas Carburizing*

Sumber: <https://muhnabil.files.wordpress.com/2012/06/proses-gas-karburising.jpg>

Karburasi gas ini juga dapat diterapkan pada baja-baja karbon rendah dengan memanfaatkan gas alam atau metan propan. Tahapan karburasi gas adalah dengan cara memanaskan baja hingga mencapai temperatur $\pm 900^{\circ}\text{C}$ dengan dicampurkan gas alam ke dalam tungku. Karbon yang berdifusi dengan menggunakan metode ini akan mampu mencapai kedalaman hingga 0,75mm saja. Adapun reaksi yang terbentuk dapat dijelaskan sebagai berikut:



Karburasi juga dapat dilakukan dengan menambahkan zat-zat padat kaya karbon pada baja yang dipanaskan. Metode ini lazim disebut dengan *pack carburizing*.

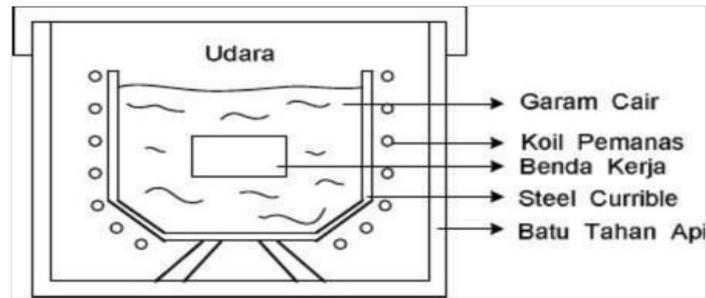


Gambar 8.2. Pack Carburizing

Sumber: <https://muhnabil.files.wordpress.com/2012/06/proses-gas-karburising.jpg>

Cara ini dilakukan dengan memasukan baja yang akan dikarburasi dan arang kayu atau batu bara secara berlapis ke dalam suatu kotak yang mampu menahan panas, yaitu kotak dari baja dengan paduan Cr-Ni hingga 20%. Kotak yang berisi baja dan arang tadi ditutup rapat kemudian dipanaskan. Temperatur pemanasan yang digunakan akan mempengaruhi kedalaman difusi karbon ke dalam baja. Pemanasan hingga temperatur daerah E diagram fasa atau sedikit di atas 900°C diikuti pencelupan ke dalam air akan diperoleh baja dengan penambahan karbon yang mampu berdifusi hingga 0,4 mm. Apabila pemanasan hanya sampai temperatur 800°C (daerah austenisasi) diikuti pencelupan cepat ke dalam air justru akan membentuk ketebalan difusi karbon hingga 1,25 mm.

Metode karburasi selanjutnya adalah dengan karburasi cair atau karbon nitridasi. Cara ini dilakukan dengan memanaskan baja yang akan dikarburasi dengan pemanasan awal hingga mendekati 400°C. Selanjutnya baja dimasukan ke dalam salt bath atau garam cianida cair yang dipanaskan hingga temperatur 900°C. Melalui proses ini akan terbentuk lapisan hingga 0,5 mm. Yang perlu diperhatikan dalam proses ini, pemanasan melebihi temperatur 900°C akan menimbulkan austenit sisa dipermukaan baja. Bertambahnya austenit sisa ini tentu memberikan dampak yang kurang baik, yaitu menjadikan baja justru malah turun kekerasannya (Eko, B. dan Sulis, D.H. 2020).



Gambar 8.3. Karburasi Cair

Sumber: <https://muhnabil.files.wordpress.com/2012/06/proses-gas-karburising.jpg>

8.2. Nitriding

Metode perlakuan permukaan ini bertujuan untuk meningkatkan kekerasan permukaan baja-baja paduan sedang hingga tinggi. Cara ini dilakukan dengan memanaskan baja dalam suatu kotak baja tertutup hingga mencapai temperatur sekitar 500°C – 590°C dalam kondisi kaya nitrogen. Pada proses ini nitrogen akan berdifusi di permukaan baja sehingga membentuk lapisan yang keras. Ada beberapa sumber nitrogen yang diperoleh dalam proses nitridasi, yaitu dengan amonia (NH_3) yang ketika dipanaskan akan terurai menjadi Nitrogen dan H_2 dan berdifusi dengan struktur ferit di permukaan baja menjadi nitrida. Amonia termasuk gas yang berbahaya jika terhirup, selain itu dapat menimbulkan ledakan, maka kontrol yang hati-hati mutlak diperlukan. Nitridasi amonia ini adalah metode nitridasi yang paling tua.



Gambar 8.4. Tungku Amonia Nitridasi

Sumber: <https://dokumen.tips/documents/makalah-nitriding.html>

Cara kedua adalah dengan cara mencampurkan garam sianida pada temperatur 550°C – 570°C yang diketahui memiliki kandungan nitrogen selain karbon. Proses ini berlangsung lebih singkat dibandingkan nitridasi dengan amonia. Metode ini sekaligus sebagai metode

nitrokarburasi yang telah kita bahas sebelumnya. Difusi nitrogen yang dihasilkan juga lebih dalam. Kekurangannya, garam yang digunakan termasuk garam yang beracun dan berbahaya, sehingga perlu kehati-hatian pada saat pelaksanaan nitridasi maupun dalam pengelolaan limbah garam.

Metode nitridasi yang ketiga adalah nitridasi plasma atau ada yang menyebut dengan nitridasi ion. Reaksi yang terjadi pada permukaan baja bukan karena temperatur, melainkan karena munculnya gas yang mengalami ionisasi yang dimunculkan medan listrik sehingga menghasilkan molekul-molekul gas yang terionisasi di sekitar permukaan baja yang dinitridasi yang disebut dengan plasma. Gas yang digunakan pada proses ini adalah nitrogen murni.



Gambar 8.5. Tungku nitridasi plasma

Sumber: <https://www.bmi-fours.com/products/process-furnaces/plasmanitriding.html>

8.3. Induction Hardening

Proses pengerasan dengan metode induksi hardening sama dengan prinsip hardening pada umumnya, yaitu memanaskan hingga mencapai austenisasi kemudian diquenching. Hanya saja teknik pemanasan dalam induksi hardening berbeda dengan metode-metode yang telah dibahas sebelumnya. Metode yang biasa diterapkan pada baja karbon 0,3% - 0,7% ini menggunakan panas yang dihasilkan oleh kumparan solenoid yang dialiri arus listrik bolak-balik dengan frekuensi tinggi (10 KHz – 50KHz). Logam baja yang dikeraskan diletakan di dekatnya. Dengan demikian akan terbentuk medan listrik dan terjadi arus eddy (*eddy current*) pada material. Arus tersebut akan menjadikan logam menjadi panas. Panas yang ditimbulkan sangat dipengaruhi oleh besarnya daya dan frekuensi listrik yang dialirkan pada kumparan.



Gambar 8.6. Pemanasan dengan Induksi

Sumber: <https://jw.dw-inductionheater.com/induksi-hardening-surfacetreatment.html>

Dengan metode ini dapat digunakan untuk mengeraskan permukaan komponen semisal gigi gear, shaft, batang piston agar lebih memiliki ketahanan aus. Kelebihan metode ini adalah dapat mengeraskan logam hanya pada lokasi tertentu, misalkan pengerasan gigi pada gear dengan tetap mempertahankan kondisi bagian. Kekurangan metode ini memerlukan investasi dan biaya operasi yang cukup mahal, kuantitas benda yang dikeraskan juga terbatas.

8.4. Flame Hardening

Flame hardening bertujuan untuk merubah struktur mikro baja pada bagian permukaan tanpa merubah komposisi kimia, contohnya adalah untuk keperluan pengerasan pada permukaan. Baja yang dikeraskan dengan metode ini umumnya baja karbon rendah hingga sedang (0,3 – 0,6% C). Proses yang dilakukan adalah dengan memanaskan baja dengan pemanas berupa api elpiji dan udara atau dengan gas asetilen dengan oksigen hingga mencapai temperatur austenisasi kemudian dicelup pada media pendingin. Cara ini dapat dilakukan dengan cara manual, namun kekurangannya dalam hal pemanasan dikawatirkan kurang merata (Hana, S. dkk. 2020).



Gambar 8.7. *Flame Hardening*

Sumber: <https://blog.metlabheattreat.com/posts/flame-hardening>

Cara otomatis dapat dilakukan dengan pemanasan yang lebih merata namun kekurangannya peralatan tidak dapat dipindah-pindah. Untuk menghindari panas yang berlebih, maka perlu kiranya menggunakan alat ukur temperatur seperti thermocopel, infrared thermometer, atau jika sudah terbiasa bisa menggunakan pedoman warna baja yang dipanaskan. Komponen yang dapat dikeraskan adalah roda gigi, crankshaft, dll. Untuk memperbaiki struktur setelah dilakukan pengerasan sebaiknya ditambah dengan laku temper.

C. Latihan

1. Jelaskan perbedaan antara heat treatment dan surface treatment!
2. Jelaskan tujuan dilakukan karburasi pada permukaan baja!
3. Ada berapa metode karburasi yang Anda ketahui, coba jelaskan!
4. Apa yang dimaksud dengan nitridasi pada baja?
5. Unsur apa saja yang dapat ditambahkan dalam nitridasi tersebut?
6. Jelaskan apa yang dimaksud dengan induksi hardening?
7. Bagaimana panas dalam induksi hardening diperoleh? Jelaskan!
8. Sebutkan kelebihan induksi hardening yang tidak dimiliki metode lain!
9. Apa yang Anda ketahui tentang flame hardening?
10. Bagaimana panas dalam flame hardening diperoleh?
11. Apa alat yang sekiranya digunakan untuk mengetahui temperatur yang dipanaskan ketika proses flame hardening tersebut?

DAFTAR PUSTAKA

- Alexander, W.O. 1985. *Dasar Metalurgi untuk Rekayasawan*. Jakarta, Penerbit: PT Gramedia Pustaka Utama.
- Alois, S. dan Karl, G. 2013. *Pengetahuan Bahan Dalam Pengerjaan Logam*. Bandung, Penerbit: Angkasa.
- Ambiyar dan Purwanto. 2008. *Fabrikasi Logam*, Padang, Penerbit: Universitas Negeri Padang PRESS.
- Andrey B. 2018. *Microstructure and Mechanical Properties of Structural Metals and Alloys*. Switzerland, Publisher: MDPI.
- Angelo, P.C. and Ravisankar, B. 2019. *Introduction to Steels Processing Properties and Applications*. New York, Publisher: Imprint CRC Press.
- Anrinal. 2013. *Metalurgi Fisik*. Yogyakarta, Penerbit: ANDI.
- ASM International. 2013. *Introduction to Steel Heat Treatment, in Steel Heat Treating Fundamentals and Processes*, vol. 4A, J. Dossett and G. E. Totten, Eds., Logams Park, OH: ASM International, , pp. 3-25.
- ASM International. 1986. *ASM Handbook Vol. 9 Publication Information and Contributors Metallography and Microstructures*. USA, Publisher: ASM International.
- ASM International. 1998. *Metals Hand Book Desk* 2nd. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.mhde2.9781627081993>.
- ASM International. 2006. *Practical Heat Treating, Fundamentals of the Heat Treating of Steel* 2nd Edition.
- ASTM International. 2018. *Steel Standards*. <https://www.astm.org/Standards/steel-standards.html>.
- Bondan, T.S. 2010. *Pengantar Logam Teknik*. Jakarta, Penerbit: Salemba Teknika.
- Choliq, A. dkk. 2021. *Metalurgi Fisik*. UNPAM PRESS. Jl. Surya Kencana No.1 Pamulang Gd. A, Ruang 211 Universitas Pamulang. Tangerang Selatan – Banten. ISBN: 978-623-6352-12-0. Email: unpampress@unpam.ac.id.
- Darmawi, D. 2021. *Tempering Terhadap Parang Hasil Tempa Tradisional Untuk Meningkatkan Keliatan*. Palembang, Publisher: Universitas Sriwijaya.
- Diana, M.H. 2018. *The Evaluation of Indonesian National Standardization (SNI) Policy to Wards Import in Steel Industry*. Journal of Public Administration Studies. Malang, Publisher: Universitas Brawijaya.
- Dody P. 2010. *Teknologi Rekayasa Logam*. Jakarta, Penerbit: Universitas Trisakti.
- Eko, B. dan Sulis, D.H. 2020. *Pengujian Logam*. Lampung, Penerbit: Laduny Alifatana.
- Elisabete A. 2000. *Surface Treatments and Coatings for Metals. A General Overview Surface Treatments, Surface Preparation, and the Nature of Coating*. USA, Publisher: American Chemical Society
- George, E.D. Translator: Sriati J. 2019. *Metalurgi Mekanik*. Jakarta, Penerbit: Erlangga.
- Guy, A.G. 1962. *Physical Metalurgy for Engineers*. Addison – Wesley Publishing Company, Inc., USA.

- Gojic, M. dan Kozuh, S. 2006. *Development of Direct Reduction Process and Smelting Reduction Processes for the Steel Production*, Kemija u industriji/Journal of Chemists and Chemical Engineers.
- Hana, S. dkk. 2020. *Karakteristik Pengaruh Suhu Sintering Terhadap Kekerasan, Porositas, dan Penyusutan Roda Gigi Lurus Berbahan Serbuk Logam*. 2020. Publisher: JMI Vol. 42 No. 1, Juni 2020.
- Harry, B.R.H. 2017. *Steels: Microstructure and Properties. 4th Edition*. Publisher: Butterworth-Heinemann.
- John, E.B. 2016. *Handbook of Comparative World Steel Standards ASTM DS67B 5ft - Ed, USA*, ASTM International.
- Keller, T.C. 2021. *Common Types of Surface Treatments for Metal Parts*, USA, Publisher: KTC Corp.
- Mahi, S. dan Sam, S. 2014. *Metals Handbook Vol. 5 Forging and Casting Eight Edition*. NY City, Publisher: Mcgraw-Hill Education.
- Prabowo, dkk. 2012. *Pengaruh Temperatur Annealing Sambungan Las SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Terhadap Sifat Mekanis Dan Fisis Baja K-945 EMS-45*, Journal of Mechanical Engineering Learning ISSN 2252-651X Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang.
- Reza, P. dkk. 2019. *Pengantar Pengolahan Bahan Logam*. Lhouksumawe. P: Sefa Bumi Persada, Sinha, Anil Kumar, (1989). *Ferrous Physical Metallurgy*. United States of America, Butterworth Publishers.
- Robert, W. Cahn and Peter, H. 1996. *Physical Metallurgy*. Volume I. Fourth, Revised And Enhanced Edition. ISBN 0444 898751. ©1996 Elsevier Science B.V. All Rights Reserved. North-Holland.
- Smallman, R.E. and Bishop, R.J. 1985. *Metal and Irons, Science, Processes, Applications*. London. P: Butterworths.
- Smith, W. 1981. *Structure and Properties of Engineering Alloys*. USA, P: Mc. Graw Hill.
- Snyder, R. L. et al. 2000. *Defect and Microstructure Analysis by Diffraction (Hardback)*. UK, Publisher: Oxford University Press.
- Sofyan, B. T. 2010. *Pengantar Logam Teknik*. Jakarta, Penerbit: Salemba Teknik.
- Sofyan, A.K.M. 2019. *Elektro Metalurgi Logam – Baja dan Paduan Logam (Peleburan Logam, Baja dan Logam Non-Ferrous dalam Tanur-tanur Listrik/Elektro)*. Bandung, Penerbit: Alfabeta.
- Harry, B.R.H. 2017. *Microstructure and Properties 4th Edition [Book]*. Butterworth-Heinemann.
- Soedjono dan Hartanto. 2013. *Pengolahan Logam dan Baja*. Bandung, Penerbit: Titian Ilmu.
- Syahrudin, R. 2014. *Ilmu Pengolahan Logam*. Jogjakarta, Penerbit: Deepublish, CV. Budi Utama.

BUKU AJAR MATA KULIAH METALURGI FISIK (PHYSICAL METALLURGY)*Dr. Frans Robert Bethony, S.T., M.T.***KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI****UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA TORAJA**

Kantor: Jln Nisantara No 12 Makale – Tana Toraja

Website: www.ukit.ac.id - E-mail: ukitoraja@.ac.id**RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER****(RPS)**

Mata Kuliah	Kode	Rumpun MK	Semester	Bobot (SKS)	Tahun Penyusunan
Metalurgi Fisik	211MKBO3	Mata kuliah wajib	3	SKS: 3	2019
Otorisasi	Dosen Pengembang RPS		Ka PRODI		
	<u>Dr. Frans Robert Bethony, S.T., M.T.</u>		<u>Nitha, S.T., M.T.</u>		
Capaian Pembelajaran Lulusan	Lulusan dapat mengetahui industri mineral dan bijih logam (<i>mineral and metal ore industry</i>), jenis-jenis dan standarisasi logam (<i>metals diversity and standardiation</i>), sifat-sifat mekanik, fisik, kimia, dan teknologi logam (<i>mechanical, physical, chemical, and technological properties of metals</i>), ikatan atom dan struktur mikro logam (<i>atomic bonding and microstructure of metals</i>), ketidaksempurnaan logam (<i>imperfection of metals</i>), diagram fasa logam (<i>phase diagram of metals</i>), perlakuan panas logam (<i>heat treatment of metals</i>), dan perlakuan permukaan logam (<i>surface treatment of metals</i>)				
Capaian Pembelajaran Mata Kuliah	(1) Mampu memahami industri mineral dan bijih logam (<i>mineral and industry of metals ore</i>), jenis-jenis logam dan (<i>metals diversity and standardiation</i>), sifat-sifat mekanik, fisik, kimia, dan teknologi logam (<i>mechanical, physical, chemical, and technological properties of metals</i>), ikatan atom dan struktur mikro logam (<i>atomic bonding and microstructure of metals</i>), ketidaksempurnaan logam (<i>imperfection of metals</i>), diagram fasa (<i>phase diagrams</i>), perlakuan panas (<i>heat treatment</i>), dan perlakuan permukaan logam (<i>surface treatment of metals</i>).				

BUKU AJAR MATA KULIAH METALURGI FISIK (PHYSICAL METALLURGY)*Dr. Frans Robert Bethony, S.T., M.T.*

Deskripsi Mata Kuliah	(2) Mata kuliah ini menguraikan industri mineral dan bijih logam (<i>mineral and metal ore industry</i>), jenis-jenis logam dan (<i>diversity and standardiation of metals</i>), sifat-sifat mekanik, fisik, kimia, dan teknologi logam (<i>mechanical, physical, chemical, and technological properties of metals</i>), ikatan atom dan struktur mikro logam (<i>atomic bonding and microstructure of metals</i>), ketidaksempurnaan logam (<i>imperfections of metals</i>), diagram fasa (<i>phase diagrams</i>), perlakuan panas logam (<i>heat treatment of metals</i>), dan perlakuan permukaan logam (<i>surface teatment of metals</i>).
Materi Pembelajaran / Pokok Pembahasan	(1) Pengantar (2) Industri Mineral dan Bijih Logam (<i>Mineral and Metal Ore Industry</i>) (3) Jenis-Jenis dan Standarisasi logam (<i>Metals Diversity and Standardiation</i>) (4) Sifat-Sifat Mekanik, Fisik, Kimia, dan Teknologi Logam (<i>Mechanical, Physical, Chemical, and Technological Properties of Metals</i>) (5) Ikatan Atom dan Struktur Mikro Logam (<i>Atomic Bonding and Microstructure of Metals</i>) (6) Ketidaksempurnaan Logam (<i>Imperfections of Metals</i>) (7) Diagram Fasa Logam (<i>Phase Diagrams of Metals</i>) (8) Perlakuan Panas Logam (<i>Heat Treatment of Metals</i>) (9) Perlakuan Permukaan Logam (<i>Surface Teatment of Metals</i>)
Pustaka	1. Alexander, W.O. 1985. <i>Dasar Metalurgi untuk Rekayasawan</i> . Jakarta, Penerbit: PT Gramedia Pustaka Utama. 2. Andrey B. 2018. <i>Microstructure and Mechanical Properties of Structural Metals and Alloys</i> . Switzerland, Publisher: MDPI. 3. Choliq, A. dkk. 2021. <i>Metalurgi Fisik</i> . UNPAM PRESS. Jl. Surya Kencana No.1 Pamulang Gd. A, Ruang 211 Universitas Pamulang. Tangerang Selatan – Banten. ISBN: 978-623-6352-12-0. Email: unpampress@unpam.ac.id . 4. Guy, A.G. 1962. <i>Physical Metallurgy for Engineers</i> . Addison – Wesley Publishing Company, Inc., USA. 5. Harry, B.R.H. 2017. <i>Steels: Microstructure and Properties. 4th Edition</i> . Publisher: Butterworth-Heinemann. 6. Robert, W.C. and Peter, H. 1996. <i>Physical Metallurgy</i> . Volume I. Fourth, Revised and Enhanced Edition. ISBN 0444 898751. ©1996 Elsevier Science B.V. All Rights Reserved. North-Holland. 7. Smith, W.F. 1993. <i>Foundation of Metals Science and Engineering</i> . MC.Graw-Hill, Inc. Singapore.
Media pembelajaran	Laptop, LCD, Whiteboard, buku
Dosen Pengampu	Dr. Frans Robert Bethony, S.T., M.T.
Matakuliah syarat	- Material Teknik

BUKU AJAR MATA KULIAH METALURGI FISIK (*PHYSICAL METALLURGY*)

Dr. Frans Robert Bethony, S.T., M.T.

Minggu ke	Sub-CP-MK (sbg kemampuan akhir yang diharapkan)	Kriteria penilaian (Indikator)	Metode Pembelajaran (Estimasi Waktu)	Materi pembelajaran (Pustaka)	Bobot
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	Mampu menjelaskan proses perkuliahan dan memahami metode evaluasi/tugas.	Ketepatan memahami kontrak kuliah dan proses perkuliahan mata kuliah Metalurgi Fisik dan memahami metode evaluasi/tugas.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Kuliah ✓ dan Diskusi ✓ TM 2 x 50 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Pengantar <ul style="list-style-type: none"> - Kontrak Kuliah - Materi Kuliah - Penjelasan tugas - Cara evaluasi 	5 %
	Mampu menjelaskan industri mineral dan bijih logam.	Ketepatan memahami industri mineral dan bijih logam.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Kuliah ✓ dan Diskusi ✓ TM 3 x 50 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Industri Mineral dan Bijih Logam (<i>Mineral and Metals Ore Industry</i>) <ul style="list-style-type: none"> - Ilmu Metalurgi Fisik (<i>Physical Metallurgy Science</i>) - Penambangan Mineral (<i>Mining of Mineral</i>) - Pengolahan Mineral (<i>Processing of Mineral</i>) - Peleburan Bijih Logam (<i>Smelting of Metals Ore</i>) - Pengolahan Peleburan Logam (<i>Smelting Processing of Metals</i>) - Latihan Soal 	10 %
2	Mahasiswa mampu menjelaskan jenis-jenis dan standarisasi logam.	Ketepatan memahami dan menjelaskan jenis-jenis dan standarisasi logam.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Kuliah dan diskusi ✓ Tugas ✓ TM 3 x 50 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Jenis-Jenis dan Standarisasi logam (<i>Metals Diversity and Standardiation</i>) <ul style="list-style-type: none"> - Logam Besi (<i>Ferro of Metal</i>) - Logam Non-Besi (<i>Non-Ferro of Metal</i>) - Besi Tuang (<i>Cast Iron</i>) - Baja Besi (<i>Ferro of Steel</i>) 	10 %

BUKU AJAR MATA KULIAH METALURGI FISIK (*PHYSICAL METALLURGY*)

Dr. Frans Robert Bethony, S.T., M.T.

				<ul style="list-style-type: none"> - Standarisasi Logam (<i>Standardization of Metals</i>) - Latihan Soal 	
3-5	Mahasiswa mampu mengulas sifat-sifat mekanik, fisik, kimia, dan teknologi logam.	Ketepatan menjelaskan dan memahami sifat-sifat mekanik, fisik, kimia, teknologi logam pengujian: ketangguhan, kekerasan, dan metalografi.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Kuliah dan diskusi ✓ Tugas ✓ TM 3 x 3 x 50 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sifat-Sifat Mekanik, Fisik, Kimia, dan Teknologi Logam (<i>Mechanical, Physical, Chemical, and Technological Properties of Metals</i>) - Sifat-sifat Mekanik Logam (<i>Mechanical Properties of Metals</i>) - Sifat-sifat Fisik Logam (<i>Physical Properties of Metals</i>) - Sifat-sifat Kimia Logam (<i>Chemical Properties of Metals</i>) - Sifat-sifat Teknologi Logam (<i>Tehnological Properties of Metals</i>) - Uji Ketangguhan Logam (<i>Impact Test of Metals</i>) - Uji Kekerasan Logam (<i>Hardness Test of Metals</i>) - Uji Metalografi Logam (<i>Metallography Test of Metals</i>) - Latihan Soal 	15 %

BUKU AJAR MATA KULIAH METALURGI FISIK (*PHYSICAL METALLURGY*)

Dr. Frans Robert Bethony, S.T., M.T.

6-7	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mahasiswa mampu Mengevaluasi Ikatan Atom dan Struktur Mikro (<i>Atomic Bonding and Microstructure</i>). 	<p>Ketepatan menjelaskan dan mengevaluasi Ikatan Atom dan Struktur Mikro (<i>Atomic Bonding and Microstructure</i>).</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Kuliah dan diskusi ✓ Tugas ✓ TM 2 x 3 x 50 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ikatan Atom dan Struktur Mikro Logam (<i>Atomic Bonding and Microstructure of Metals</i>) <ul style="list-style-type: none"> - Jenis-jenis Ikatan Atom Logam (<i>Types of Atomic Bonds of Metals</i>) - Struktur Mikro Logam (<i>Metal Microstructure</i>) - Struktur Non-Kubik Logam (<i>Non-Cubic Structure of Metals</i>) - Latihan Soal 	10 %
8	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mahasiswa mampu menganalisis Ketidaksempurnaan Logam (<i>Metal Imperfections</i>). 	<p>Ketepatan menganalisa Ketidaksempurnaan Logam (<i>Metal Imperfections</i>).</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Kuliah dan diskusi ✓ Tugaskelo ✓ TM 3 x 50 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ketidaksempurnaan Logam (<i>Imperfections of Metals</i>) <ul style="list-style-type: none"> - Cacat Kristal Logam (<i>Metal Crystal Defect</i>) - Deformasi Logam (<i>Deformation of Metals</i>) - Rekrystalisasi Logam (<i>Recrystallization of Metals</i>) - Latihan Soal 	10 %
9	Mid Test				
10-11	<p>Mahasiswa Mampu memprediksi fasa-fasa pada komposisi dan suhu tertentu dalam batas daya larutnya.</p>	<p>Ketepatan memprediksi fasa-fasa pada komposisi dan suhu tertentu dalam batas daya larutnya.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Kuliah dan diskusi ✓ Tugas ✓ TM 3 x 3 x 50 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Diagram Fasa Logam (<i>Phase Diagrams of Metals</i>) <ul style="list-style-type: none"> - Diagram TTT Logam (<i>Time Temperature Transformation Diagrams of Metals</i>) - Diagram CCT Logam (<i>Cooling Continues Transformation of Metals</i>) 	15 %

BUKU AJAR MATA KULIAH METALURGI FISIK (*PHYSICAL METALLURGY*)*Dr. Frans Robert Bethony, S.T., M.T.*

12-13	Mahasiswa mampu memahami perulogam teknik sifat-sifat logam teknik karena perlakuan panas.	Ketepatan memahami perulogam teknik sifat-sifat logam teknik karena perlakuan panas.	✓ Kuliah dan diskusi ✓ Tugas ✓ TM 2 x 3x 50	✓ Perlakuan Panas Logam (<i>Heat Treatment of Metals</i>) - Proses Anil Logam (<i>Annealing Process of Metals</i>) - Proses Normalisasi Logam (<i>Normalizing Process of Metals</i>) - Proses Pengerasan Logam (<i>Hardening Process of Metals</i>) - Proses Temper Logam (<i>Tempering Process of Metals</i>) - Latihan Soal	15 %
14-15	Mahasiswa memahami dan mampu menganalisa kerusakan logam.	Ketepatan Memahami serta menganalisa kerusakan logam.	✓ Kuliah dan diskusi ✓ Tugas ✓ TM 3 x 50	✓ Perlakuan Permukaan Logam (<i>Surface Treatment</i>) - Proses Pengarbonan Logam (<i>Carburizing Process of Metals</i>) - Proses Nitridasi Logam (<i>Nitriding Process of Metals</i>) - Proses Pengerasan Induksi Logam (<i>Induction Hardening Process of Metals</i>) - Proses Pengerasan Nyala Api Logam (<i>Flame Hardening Process of Metals</i>) - Latihan Soal	15 %
16	<i>Final Test</i>				