

BUKU AJAR

**PENGETAHUAN
BAHAN
TEKNIK**

PRANTASI HARMITJAHJANTI



**Buku Ajar Mata Kuliah
Pengetahuan Bahan Teknik**

**Oleh
Prantasi Harmi Tjahjanti**



**Diterbitkan oleh
UMSIDA PRESS**

Tahun 2019

Buku Ajar
Pengetahuan Bahan Teknik

Penulis :
Prantasi Harmi Tjahjanti.

ISBN :
978-602-5914-85-0

Editor :
Septi Budi Sartika, M.Pd
M. Tanzil Multazam , S.H., M.Kn.

Copy Editor :
Fika Megawati, S.Pd., M.Pd.

Design Sampul dan Tata Letak :
Mochamad Nashrullah, S.Pd

Penerbit :
UMSIDA Press

Redaksi :
Universitas Muhammadiyah Sidoarjo
Jl. Mojopahit No 666B
Sidoarjo, Jawa Timur

Cetakan pertama, Agustus 2019

© Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dengan suatu
apapun tanpa ijin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Assalammu'alaikum,wr,wb
Alhamdulillahirobbil'alamin,

Kepakaran penulis adalah bidang *Materials Science and Engineering* yang hingga saat ini selain terus melakukan penelitian khususnya tentang bahan/material, juga sebagai *Reviewer* untuk bidang-bidang material dan lainnya. Ini buku ke tiga penulis sebagai penulis utama dengan judul Buku Ajar: *Pengetahuan Bahan Teknik*. Buku ini merupakan buku pegangan bagi mahasiswa Fakultas Teknik, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, dan mahasiswa Politeknik pada umumnya. Pembuatan buku dimaksudkan juga untuk menambah tersedianya buku di Indonesia karena buku sejenis ini tidak banyak di dapat di Indonesia. Buku ini disusun dengan mengambil berbagai sumber referensi yang sangat bagus juga didukung oleh pengalaman penulis mengajar mata kuliah Pengetahuan Bahan Teknik selama hampir kurang 18 tahun serta dilengkapi dengan serangkaian penelitian yang dilakukan selama ini. Penulis sangat berharap agar buku ini dapat membantu mahasiswa dalam memahami, menyusun, mengembangkan pengetahuan mereka tentang teori maupun aplikasi dari material komposit.

Buku ini dimulai dengan bahasan mengenai Pendahuluan Pengetahuan Bahan Teknik yang didalamnya menjelaskan tentang jenis bahan/material, mulai logam hingga bahan komposit. Bahasan berikutnya tentang Atom, Struktur Kristal dan Cacat Kristal meliputi pengertian tentang atom hingga cacat kristal. Berikutnya disajikan tentang Diagram *Phase* yaitu diagram yang menjelaskan tentang bagaimana cara pembuatan bahan dengan menggunakan cara

pengecoran. Bahasan selanjutnya adalah tentang Sifat Mekanik Bahan dan Pengujian Merusak (*Destructive*), yang dilanjutkan dengan Pengujian Tidak Merusak (*Non Destructive Test*). Hingga pada materi akhir dibahas tentang proses Korosi baik jenis jenis korosi maupun cara pengujianya.

Buku ini disusun tidak hanya dengan materi yang lengkap namun juga ada unsur pedagogi untuk memfokuskan pembelajaran dan mengetahui kompetensi pemahaman akan materi yang diberikan. Karena itu diberikan tujuan instruksional pada setiap awal bab dengan maksud agar materi atau pembahasan dalam tiap bab dapat tercapai. Soal-soal juga diberikan di setiap akhir bab dengan tujuan untuk membantu pemahaman mahasiswa.

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada mahasiswa-mahasiswa bimbingan penulis yang telah membantu dalam penyusunan buku ini dengan beberapa hasil penelitiannya masuk dalam buku ini, serta membuatkan sebagian ilustrasi dan gambar. Terimakasih juga pada suami Imam Buchori yang memberikan sentuhan akhir pada buku ini. Penulis juga menghaturkan terimakasih kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo (UMSIDA) melalui Lembaga Pengkajian Pengembangan Pendidikan Al-Islam & Kemuhammadiyah (LP3IK) yang telah memberikan keleluasaan dan dorongan untuk terus berkarya.

Selanjutnya, apa yang telah penulis kerjakan dalam penyelesaian buku ini, tentu saja sangat dilakukan dengan teliti dan sungguh-sungguh, namun demikian untuk mencapai kesempurnaan, penulis sangat mengharap adanya saran, kritik, diskusi, koreksi ataupun sanggahan yang sifatnya membangun, dan dengan hati yang terbuka, penulis sangat mengharapkan masukan-masukan tersebut sebagai penulisan buku selanjutnya.

Akhirnya, semoga buku yang telah jadi ini dapat memberikan manfaat bagi mahasiswa dan pembaca semuanya, khususnya yang

memiliki bidang yang terkait dengan buku ini. Semoga Allah SWT, selalu melimpahkan rahmat-Nya kepada kita semua.

Amin.

Wassalamu'alaikum, wr,wb

Sidoarjo, Juni 2019

Prantasi Harmi Tjahjanti

prantasiharmi@umsida.ac.id

DAFTAR ISI

Kata Pengantar

Bab 1 Pendahuluan Pengetahuan Bahan Teknik

- 1.1 Jenis Bahan/Material
- 1.2 Bahan Logam
 - 1.2.1 Logam *Ferrous* (Besi)
 - 1.2.2 Logam Non *Ferrous*
- 1.3 Bahan Non Logam
 - 1.3.1 Bahan Keramik
 - 1.3.2 Bahan Polimer
- 1.4 Bahan Komposit

Soal-soal

Bab 2 Atom, Struktur Kristal dan Cacat Kristal

- 2.1 Atom
- 2.2 Struktur Kristal
- 2.3 Faktor Pemampatan Atom (*Atomic Packing Factor*)
- 2.4 Paduan/*Alloy*

2.5 Cacat Kristal

Soal-soal

Bab 3

Diagram *Phase*

3.1 Pengertian Diagram *Phase*

3.2 Diagram *Phase* Bahan Paduan

3.3 Diagram *Phase* Bahan Keramik

3.4 Diagram *Phase* Bahan Polimer

Soal-soal

Bab 4

Sifat Mekanik Bahan dan Pengujian Merusak (*Destructive*)

4.1 Sifat-sifat Mekanik

4.2 Pengujian Sifat Mekanik

4.3 Pengertian Diagram Tegangan-Regangan

4.4 Deformasi Elastis

4.5 Deformasi Plastis

Soal-soal

Bab 5

Pengujian Tidak Merusak (*Non Destructive Test*)

5.1 Ultrasonik Tes (UT)

5.2 Radiografi Tes

Soal-soal

Bab 6

Korosi

6.1 Pengertian Korosi

6.2 Jenis-jenis Korosi

6.3 Jenis-jenis Uji Korosi

Soal-soal

BAB 1 PENDAHULUAN PENGETAHUAN BAHAN TEKNIK

CAPAIAN PEMBELAJARAN

Diharapkan mahasiswa dapat mengenal, dan mengerti isi dari bab ini khususnya tentang Pendahuluan Pengetahuan Bahan Teknik yang didalamnya menjelaskan tentang jenis bahan/material, mulai logam hingga bahan komposit.

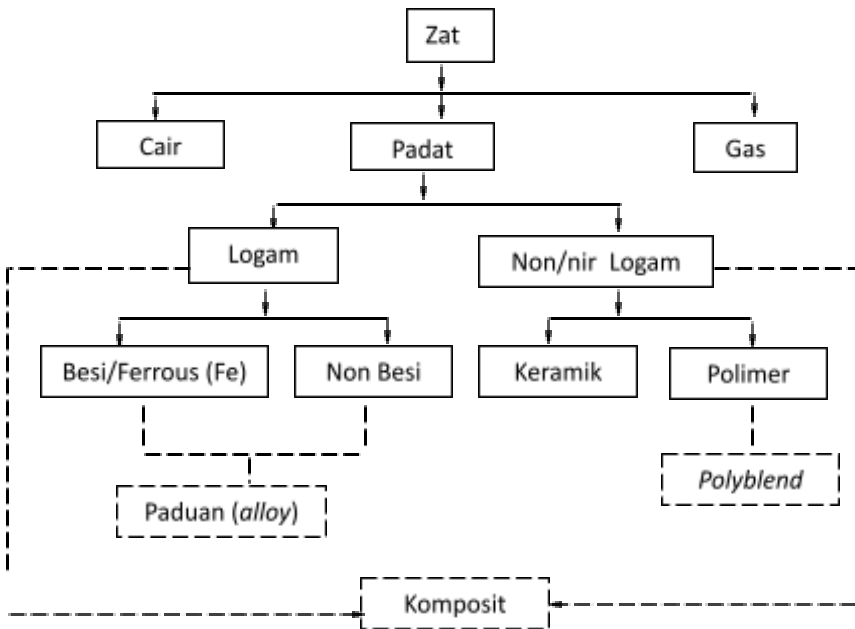
1.1 Jenis Bahan/Material

Saat kita di Sekolah Dasar dulu, pernah mendapat pelajaran tentang zat, yang menjelaskan bahwa zat adalah sesuatu yang menempati ruang/area dan memiliki/mempunyai massa. Zat dibedakan menjadi 3 macam zat, yakni zat gas, zat cair, dan zat padat.

Secara lengkap dituangkan dalam Tabel Periodik unsur kimia pada Gambar 1.1. Warna biru menunjukkan bahan padat, warna oranye adalah bahan gas, dan warna kuning adalah bahan cair. Dalam Pengetahuan Bahan Teknik, zat padat yang banyak dibahas, dan biasanya disebut sebagai bahan/material, dibedakan menjadi dua yaitu logam dan non/nir logam. Lebih jelasnya diagram pembagian zat padat pada Gambar 1.2. Bahan logam dari dulu hingga sekarang ini yang masih sangat favorit adalah logam besi/ferrous (Fe), sehingga bahan logam dibedakan menjadi bahan logam Fe dan non Fe. Baja termasuk dalam logam Fe, karena bahan terbanyak untuk pembuatan baja adalah Fe. Sementara bahan non Fe, banyak jenisnya misal aluminium (Al), Zeng (Zn), tembaga (Cu), perak (Ag), dan lainnya. Campuran dari bahan-bahan logam disebut paduan/alloy, beberapa contohnya adalah monel, perunggu dan lainnya.

Sedangkan bahan non/nir logam dibedakan menjadi dua yaitu bahan keramik dan bahan polimer. Bahan-bahan polimer yang digabung menjadi satu dinamakan polyblend. Lebih jauh campuran antara bahan logam dan non logam dapat dibuat menjadi bahan

Gambar 1.1 Tabel Periodik unsur kimia



Gambar 1.2 Diagram pembagian zat padat

komposit. Jadi secara ringkas ilmu material/bahan merupakan pengetahuan dasar tentang struktur, sifat-sifat dan pengolahan bahan.

1.1.1 Bahan Logam

Bahan logam mempunyai sifat-sifat umum seperti kuat, ulet, mudah dibentuk dan bersifat penghantar panas dan listrik yang baik.

- Keramik
Keras, getas dan penghantar panas dan listrik yang buruk

- Polimer
kerapatan rendah, penghantar panas dan listrik buruk dan mudah dibentuk
- Komposit
merupakan gabungan dari dua bahan atau lebih yang masing-masing sifat tetap

Sifat-sifat Bahan Teknik ditinjau dari Karakteristiknya

Pemilihan Bahan dalam Desain Pemilihan bahan untuk keperluan bukan suatu hal yang sulit, asalkan tidak disertai dengan berbagai persyaratan, seperti misalnya mudah diperoleh, mudah dikerjakan atau diproses sehingga menghasilkan mutu yang sesuai dengan spesifikasi dan harga yang murah. Sebenarnya prinsip pemilihan bahan sederhana saja hanya perlu mempertimbangkan syarat-syarat sifat yang diminta oleh desain konstruksi dengan sifat-sifat kemampuan bahan yang dapat dipergunakan. Cuma saja dalam petentuan persyaratan masih ada kesulitan mungkin informasi tentang bahan yang tersedia tidak lengkap atau informasi tentang sifat bahan belum lengkap ada. Walaupun informasi itu sudah lengkap mungkin saja akan dijumpai bahwa tidak ada bahan yang mampu memenuhi semua persyaratan. Dalam hal ini perlu diadakan suatu pemilihan ulang dengan mengurangi persyaratan lagi sehingga didapat suatu pilihan yang optimum. Biasanya persyaratan yang diminta oleh suatu desain konstruksi meliputi sifat-sifat sebagai berikut :

1. Sifat mekanik meliputi: kekuatan, ketanguhan, kekerasan, keuletan kegetasan dan lainnya.
2. Sifat fisik seperti heat conductivity, electrical conductivity, heat expansion, dimensi dan struktur mikro.
3. Sifat Kimia seperti : tahan korosi, aktivitas terhadap bahan kimia.

4. Dan lain-lainnya Faktor-faktor lain yang juga harus dipertimbangkan dalam desain adalah a. Teknologi yang tersedia untuk pengolahan bahan tersebut sampai menjadi produk yang siap digunakan. b. Faktor ekonomis misal : harga bahan produk, ongkos produk, harga material, dll c. Availability dari bahan, seperti apakah bahan tersedia di pasaran, dimana dapat diperoleh seberapa banyak bahan yang tersedia. Proses pemilihan bahan seringkali juga dapat disederhanakan misalnya dengan mempersempit daerah pemilihan, dengan memberi prioritas pada yang biasa digunakan untuk konstruksi yang sejenis. Seperti misalnya pada teknik permesinan baja karbon akan mendapat prioritas pertama untuk dipertimbangkan (karena dalam konstruksi biasanya orang banyak menggunakan baja karbon, mudah diperoleh, harga relatif murah), baru kemudian bila baja karbon tidak memenuhi syarat dicoba mempertimbangkan penggunaan bahan-bahan lain, seperti baja paduan, besi cor, paduan non besi.

2.7. Jenis bahan

Untuk memudahkan pembahasan, bahan dibagi atas tiga kelompok utama yaitu : logam, polimer (atau plastik) dan keramik. Kenyataannya pengelompokan ini merupakan pembagian yang ideal karena kebanyakan bahan memiliki sifat gabungan.

Logam

Bahan ini memiliki ciri-ciri : daya hantar panas dan daya hantar listriknya tinggi. Kedap cahaya dan biasanya dapat dipolis sampai mengkilap. Disamping itu logam agak berat dan mudah dibentuk.

Faktor-faktor apa yang melandasi karakteristik tersebut diatas ?. Jawaban yang paling sederhana ialah bahwa sifat logam tersebut oleh karena beberapa elektron terdislokalisir dan dapat meninggalkan atom induknya. Karena beberapa elektron dalam logam terdislokalisir,

mereka dengan mudah memindahkan muatan listrik dan energi thermal.

Sifat kedap cahaya dan daya pantul logam disebabkan oleh tanggap elektron yang terdislokalisir terhadap getaran elektromagnetik pada frekuensi tinggi. Hal ini juga merupakan hasil daripada kebebasan partial beberapa elektron dari atom induknya.

Polimer (atau plastik)

Polimer mempunyai BD yang rendah dan dapat digunakan sebagai bahan isolator panas dan listrik. Kurang baik memantulkan cahaya dan cenderung tembus cahaya dan bening. Berat jenis fleksibel dan dapat dirubah bentuknya (*deformasi*). Sifat ini dimanfaatkan pada proses pembentukan.

Tiap elektron yang bergabung dengan atom tertentu (atom tertentu). Oleh karena itu daya hantar listrik dan thermal polimer sangat kecil, disebabkan semua energi thermal diteruskan dari daerah yang dingin kedaerah yang panas dengan getaran atom, suatu proses yang lambat dibandingkan dengan transpor energi elektronik yang terdapat dalam logam. Selain itu elektron lamban bergerak dalam polimer lebih muda menyesuaikan getarannya dengan cahaya, oleh karena itu tidak menyerap berkas cahaya.

Keramik

Keramik adalah campuran yang terdiri dari unsur logam dan bukan logam. Banyak sekali contoh bahan keramik, mulai dari semen adukan beton (termasuk batu-batuannya), gelas, bahan isolasi busi. Sampai dengan oksida bahan-bahan nuklir UO_2 .

Setiap jenis bahan tersebut diatas, tadi keras dan rapuh. *Kekerasan dan kerapuhan merupakan ciri khusus dari keramik*, disamping itu keramik

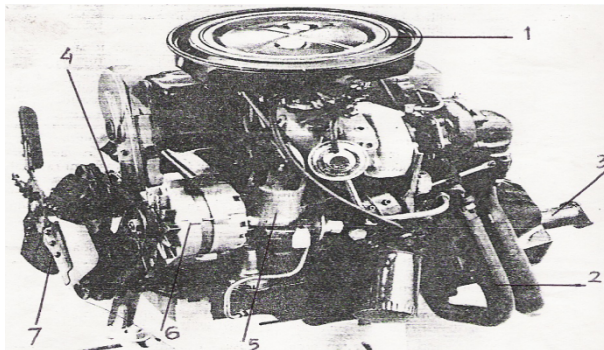
juga lebih tahan terhadap suhu tinggi dan lingkungan yang lebih berat persyaratannya. Dibandingkan dengan logam dan polimer. Dasar dari karakteristik ini ialah sifat elektronik atomnya.

SOAL-SOAL

1. Sebutkan terbuat dari bahan logam, plastik (polimer), keramik, komposit atautkah logam paduan (alloy) peralatan-peralatan di bawah ini :

- Rangka busi mesin bahan bakar bensin
- Penggorengan yang terbuat dari teflon
- Medali yang terbuat dari perunggu
- Beton bertulang dan plastik yang diperkuat
- Alat pancing ikan yang terbuat dari *fiber glass* dengan serat
- Alat permesinan yang terbuat dari baja
- Lembaran baja berlapis plastik agar tahan terhadap korosi.

2. Gambar di bawah ini adalah mesin mobil yang terdiri dari ratusan jenis bahan. Sebutkan terbuat dari bahan apakah bagian-bagian mobil yang telah diberi nomer tersebut.



- No. 1 = Filter udara
- No. 2 = Pipa gas buang
- No. 3 = Pipa knalpot
- No. 4 = Fan belt
- No. 5 = Pengapian
- No. 6 = Dinamo ampere
- No. 7 = Kipas pendingin

BAB 2: ATOM, STRUKTUR KRISTAL DAN CACAT KRISTAL

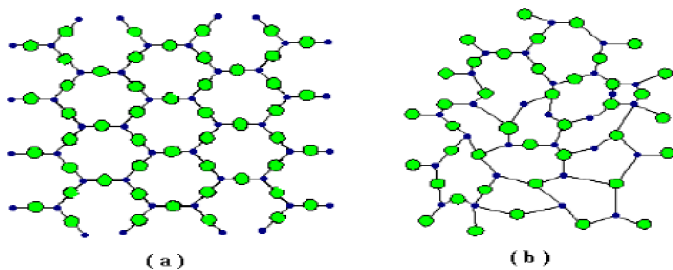
CAPAIAN PEMBELAJARAN

Diharapkan mahasiswa dapat mengerti tentang Atom, Struktur Kristal dan Cacat Kristal meliputi pengertian tentang atom hingga cacat Kristal.

A. Kristal

Kristal merupakan benda padat yang terbentuk dari komposisi atom-atom, ion-ion atau molekul-molekul dengan susunan berulang dan jarak yang teratur dalam tiga dimensi. Keteraturan susunan tersebut terjadi karena kondisi geometris yang harus memenuhi adanya ikatan atom yang berarah dan susunan yang rapat. Ditinjau dari struktur atom penyusunnya, benda padat dibedakan menjadi tiga yaitu kristal tunggal (monocrystal), polikristal (polycrystal) dan amorf (Smallman, 2000: 13). Pada kristal tunggal, atom atau penyusunnya mempunyai struktur tetap karena atom-atom atau molekul-molekul penyusunnya tersusun secara teratur dalam pola tiga dimensi dan pola-pola ini berulang secara periodik dalam rentang yang panjang tak

berhingga. Polikristal dapat didefinisikan sebagai kumpulan dari kristal-kristal tunggal yang memiliki ukuran sangat kecil dan saling menumpuk yang membentuk benda padat. Struktur amorf menyerupai pola hampir sama dengan kristal, akan tetapi pola susunan atom-atom, ion-ion atau molekul-molekul yang dimiliki tidak teratur. Amorf terbentuk karena proses kristalisasi yang terlalu cepat sehingga atom-atom tidak dapat dengan tepat menempati lokasi kisinya, benda seperti gelas, plastik dan aspal memiliki struktur yang identik dengan amorf. Gambar susunan dua-dimensional simetris dari dua jenis atom yang berbeda antara kristal dan amorf ditunjukkan pada Gambar 1.

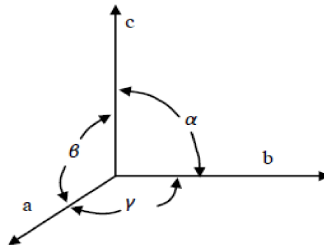


Gambar 1. (a). Susunan Atom Kristal, (b). Susunan Atom Amorf
(Smallman, 2000: 13)

1. Struktur Kristal

Susunan khas atom-atom dalam kristal disebut struktur kristal. Struktur kristal dibangun oleh sel satuan (unit cell) yang merupakan sekumpulan atom yang tersusun secara periodik berulang di dalam kisi ruang. Pada suatu sel satuan, tiga buah sumbu merupakan sumbu kristal teratur yang berhubungan dengan atom atau ion yang sama. Dimensi suatu sel satuan ditentukan oleh perpotongan konstanta sumbu-sumbu a , b dan c seperti pada Gambar 2.

Geometri kristal dalam ruang dimensi tiga yang merupakan karakteristik kristal memiliki pola yang berbeda-beda. Suatu kristal yang terdiri dari jutaan atom dapat dinyatakan dengan ukuran, bentuk dan susunan sel satuan yang berulang dengan pola pengulangan yang menjadi ciri khas masing-masing kristal.



Gambar 2. Sumbu dan Sudut Antar Sumbu Kristal

(Edi Istiyono, 2000: 6)

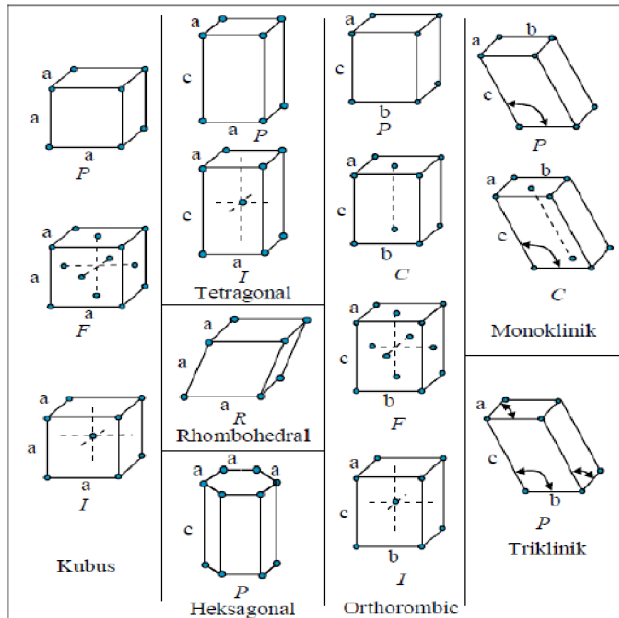
Berdasarkan perbandingan parameter kisi a , b dan c , serta hubungan antara sudut satu dengan sudut yang lainnya (α , β , γ), dapat diperoleh tujuh sistem kristal dan empat belas kisi Bravais. Ketujuh sistem kristal yang terdiri dari empat belas kisi Bravais adalah seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Tujuh Sistem Kristal dan 14 Kisi Bravais

(Van Vlack, 2004: 62)

Sistem Kristal	Parameter Kisi	Kisi Bravais	Simbol
Kubik	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simple	P
		pusat badan	I
		pusat muka	F
Monoklinik	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	Simpel pusat dasar	P C
Triklidik	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	Simpel	P
Tetragonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simpel	P
		pusat badan	I
Orthorombik	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Simpel	P
		pusat dasar	C
		pusat badan pusat muka	I F
trigonal / rhombohedral	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ < 120^\circ$	Simpel	P
hexagonal / rombus	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Simpel	P

Pada Tabel 1 sel primitif diberi tanda huruf P (*primitif*); sel dengan simpul kisi yang terletak pada pusat dua bidang sisi yang paralel diberi tanda C (*center*); sel dengan simpul kisi di pusat setiap bidang kisi diberi tanda F (*face*); sel dengan simpul kisi di pusat bagian dalam sel unit ditandai dengan huruf I (*inti*). Gambar ilustrasi tujuh sistem kristal dan 14 kisi bravais dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.



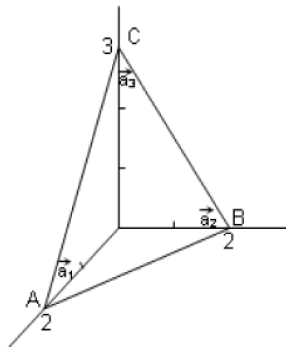
Gambar 3. Tujuh Sistem Kristal dan Empat Belas Kisi Bravais
(Milton Ohring, 1992: 26)

2. Indeks Miller

Dalam sistem tiga dimensi, kisi kristal akan membentuk pasangan bidang-bidang sejajar dan berjarak sama yang disebut bidang-bidang kisi. Bidang-bidang kisi inilah yang akan menentukan arah permukaan dari suatu kristal. Bidang-bidang kisi pada kristal sangat mempengaruhi perilaku dan sifat bahan. Bidang-bidang yang paling mudah digambarkan adalah bidang yang membatasi sel satuan dengan bidang lainnya. Arah suatu bidang dapat dinyatakan dengan parameter numeriknya, yang selanjutnya dibuat menjadi bilangan bulat terkecil. Bilangan ini disebut indek Miller, yang biasanya dinyatakan dengan

simbol (h k l). Untuk arah bidang digunakan simbol atau lambang [h k l] dan untuk bidang kristal digunakan lambang (h k l).

Sebagai contoh penentuan suatu bidang dengan indeks Miller (332) seperti langkah-langkah berikut ini (Wiendartun, 2012: 7):



Gambar 4. Perpotongan Bidang Kristal ABC
(Wiendartun, 2012: 7)

a. Menentukan titik potong antara bidang yang bersangkutan dengan sumbu-sumbu (,)/ sumbu-sumbu primitif atau konvensional dalam satuan konstanta lattice (a_1, a_2, a_3).

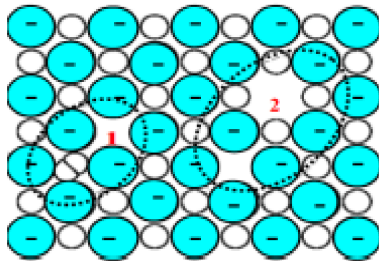
b. Menentukan kebalikan (reciprocal) dari bilangan-bilangan tadi, dan kemudian tentukan tiga bilangan bulat (terkecil) yang mempunyai perbandingan yang sama. Indeks (h k l).

Bidang ABC pada Gambar 4 memotong sumbu-sumbu di $2a_1$, di $2a_2$ dan di $3a_3$. Bila diambil kebalikannya diperoleh $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$, dan selanjutnya ketiga bilangan tersebut dikalikan dengan bilangan 6 (KPK dari penyebut bilangan) dan diperoleh 3 3 2. Indek Miller dari bidang ABC tersebut adalah (3 3 2).

3. Ketidaksempurnaan pada Kristal

Berdasarkan struktur kristal, atom dalam setiap butir material tersusun secara teratur, tetapi terdapat berbagai ketidaksempurnaan kristal atau cacat kristal. Cacat yang terdapat pada kristal memiliki beberapa bentuk, diantaranya yaitu: cacat titik dan cacat garis.

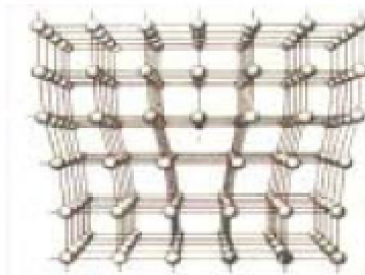
Cacat titik terjadi karena adanya penyimpangan susunan periodik kisi beberapa atom, sehingga terjadi kekosongan atom (*vacancy*), sisipan (*interstitial*) dan perpindahan kedudukan atom tak murni di sela kisi (*anti site*). Kekosongan terjadi ketika kristal kehilangan sebuah atom karena penumpukan yang salah ketika proses kristalisasi, yaitu pada saat temperatur tinggi. Pada keadaan suhu tinggi, energi *thermal* akan meningkat sehingga atom-atom akan melompat meninggalkan letak kisinya ke lokasi atomik terdekat (lihat Gambar 5). Sisipan terjadi jika terdapat atom tambahan dalam struktur kristal, sedangkan untuk *anti site* terjadi jika perpindahan ion dari kisi ke tempat sisipan



Gambar 5. Cacat Titik pada Kristal
(ciripo.wordpress.com/2011/11/11/cacat-kristal/)

Cacat garis (*linear*), muncul karena adanya diskontinuitas struktural sepanjang lintasan kristal (*dislokasi*), atau cacat akibat salah susun struktur Kristal (lihat Gambar 6). Terdapat dua bentuk dasar dislokasi yaitu: *dislokasi tepi* dan *dislokasi sekrup*. Pembentukan *dislokasi tepi* akibat adanya gesekan antara kristal dengan arah *slip*

secara sejajar. Sedangkan *dislokasi sekrup* terjadi karena pergeseran atom dalam kristal secara spiral (Marwanto, 2013: 19-20).



Gambar 6. Cacat Garis pada Kristal

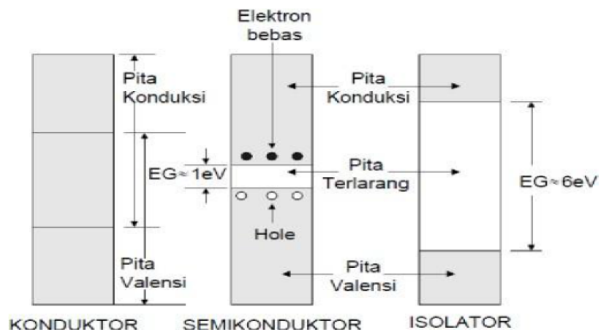
(ciripo.wordpress.com/2011/11/11/cacat-kristal/)

B. Semikonduktor

Berdasarkan kemampuan menghantarkan arus listrik, suatu bahan dibedakan menjadi tiga macam, yakni konduktor, isolator dan semikonduktor. Untuk konduktor pita valensi dan pita konduksi saling bertumpangan. Pita konduksi dan pita valensi semikonduktor dan isolator tidak bertumpangan, dan selang diantaranya menyatakan energi yang tidak boleh dimiliki elektron. Selang seperti itu disebut pita terlarang yang menunjukkan besarnya energi gap yang dimiliki bahan tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

Konduktor merupakan bahan yang memiliki resistivitas listrik kecil yaitu $10^{-5} \Omega\text{cm}$. Hal ini disebabkan dalam bahan konduktor terdapat sejumlah besar elektron bebas. Dalam tinjauan pita energi, konduktor memiliki pita konduksi dan pita valensi yang saling tindih (overlap) dan energi gap yang sangat kecil. Konduktor memiliki struktur pita energi yang hanya sebagian saja yang berisi elektron. Pita energi yang terisi sebagian merupakan pita konduksi. Medan listrik eksternal yang dikenakan pada konduktor akan mempengaruhi elektron, sehingga memperoleh tambahan energi dan memasuki tingkat energi

yang lebih tinggi. Elektron tersebut elektron bebas yang lincah dan gerakannya menghasilkan arus listrik.



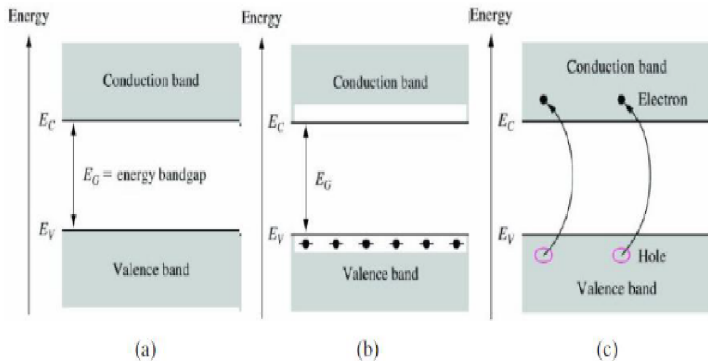
Gambar 7. Struktur Pita Energi pada Konduktor, Semikonduktor dan Isolator

(Ariswan: 2010: 3)

Isolator adalah bahan yang tidak memungkinkan arus listrik melewatinya atau suatu penghantar listrik yang buruk, memiliki harga resistivitas antara $(10^{14} - 10^{22}) \Omega\text{cm}$. Isolator memiliki pita valensi yang penuh berisi elektron, sedangkan pita konduksinya kosong. Energi gap isolator sangat besar sekitar 6 eV, sehingga energi yang diperoleh dari medan listrik eksternal terlalu kecil untuk memindahkan elektron melewati energi gap tersebut, sehingga penghantaran listrik tidak dapat berlangsung. Pada umumnya isolator memiliki dua sifat, yang pertama mempunyai celah energi yang cukup besar antara pita valensi dan yang kedua pita konduksi dan tingkat energi fermi terletak pada celah energinya (Nyoman Suwitra, 1989: 186).

Semikonduktor merupakan bahan yang konduktivitas listriknya terletak antara konduktor dan isolator, atau bahan yang memiliki resistivitas antara konduktor dan isolator (10^{-2} - 10^9) Ωm . Contoh bahan semikonduktor adalah germanium, silikon dan karbon. Semikonduktor mempunyai struktur pita energi yang sama dengan isolator, hanya saja celah energi terlarang atau energi gap (E_g) pada semikonduktor jauh lebih kecil daripada isolator. Celah energi yang tidak terlalu lebar tersebut menyebabkan semikonduktor mempunyai perilaku yang berbeda dari bahan isolator.

Berdasarkan konsep pita energi, semikonduktor merupakan bahan yang pita valensinya hampir penuh dan pita konduksinya hampir kosong dengan lebar pita terlarang E_g sangat kecil (± 1 hingga 2 eV). Pada suhu 0 K, bahan semikonduktor akan berlaku sebagai isolator dengan pita valensinya terisi penuh dan pita konduksi kosong. Namun pada suhu kamar, bahan semikonduktor akan mempunyai sifat konduktor. Energi termal diterima oleh elektron-elektron pada pita valensi. Jika energi termal lebih besar atau sama dengan E_g -nya maka elektron-elektron tersebut mampu melewati celah energi terlarang dan berpindah ke pita konduksi sebagai elektron hampir bebas. Elektron-elektron tersebut meninggalkan kekosongan pada pita valensi yang disebut dengan lubang (hole). Hole pada pita valensi dan elektron hampir bebas pada pita konduksi itulah yang berperan sebagai penghantar arus pada semikonduktor, dimana elektron merupakan pembawa muatan negatif dan hole merupakan pembawa muatan positif (Marwanto, 2013: 23).



Gambar 8. Struktur Pita Energi pada Semikonduktor

(Ariswan, 2010: 3)

(a) Keadaan dengan Elektron Terbebas dari Pita Valensi

(b) Keadaan dengan Elektron Berada pada Pita Valensi

(c) Keadaan dengan Elektron pada Pita Valensi Berpindah ke Pita Konduksi

Berdasarkan Gambar 8(b), setiap atom penyusun kristal semikonduktor memiliki sejumlah elektron valensi pada kulit terluarnya yang menempati keadaan valensi, keadaan elektron valensi ini memiliki tingkat energi yang besarnya E_V . elektron valensi ini berkontribusi pada pembentukan ikatan kovalen antara atom-atom penyusun kristal semikonduktor. Sedangkan Gambar 8(a) adalah keadaan dimana elektron sudah terbebas dari ikatan kovalen disebut keadaan konduksi dengan tingkat energi E_C . Apabila Kristal semikonduktor tersebut temperaturnya dinaikkan maka akan ada penambahan energi termal yang menyebabkan terputusnya ikatan kovalen yang terbentuk. Pemutusan ikatan kovalen ini akan menghasilkan elektron bebas yang sudah dalam keadaan konduksi dengan tingkat energi E_C . Pada Gambar 8(c) diilustrasikan keadaan elektron konduksi dimana setelah terjadinya pemutusan ikatan kovalen, elektron valensi pada tingkat energi E_V akan berpindah ke keadaan konduksi dengan tingkat energi E_C . Selisih antara tingkat energi konduksi dengan tingkat energi valensi ini dinamakan

energi celah pita (energy gap) yang merupakan energi minimal yang dibutuhkan untuk memutuskan ikatan kovalen pada kristal semikonduktor (Marwanto, 2013: 24).

Bahan semikonduktor dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik.

1. Semikonduktor Intrinsik

Semikonduktor intrinsik adalah suatu bahan semikonduktor dalam bentuk yang sangat murni, dimana sifat-sifat kelistrikan ditentukan oleh sifat-sifat asli yang melekat pada unsur tersebut. Contohnya adalah silikon dan germanium. Dalam semikonduktor intrinsik, banyaknya hole di pita valensi sama dengan banyaknya elektron di pita konduksi. Gerakan termal terus menerus menghasilkan pasangan elektron-hole yang baru, sedangkan elektron-hole yang lain menghilang sebagai akibat proses rekombinasi. Konsentrasi (rapat) hole p harus sama dengan konsentrasi (rapat) elektron n , sehingga

$$n = p = n_i \quad (1)$$

dengan n_i disebut konsentrasi atau rapat intrinsik.

Energi fermi (E_f) pada semikonduktor intrinsik terletak antara pita konduksi dan pita valensi yang besarnya adalah :

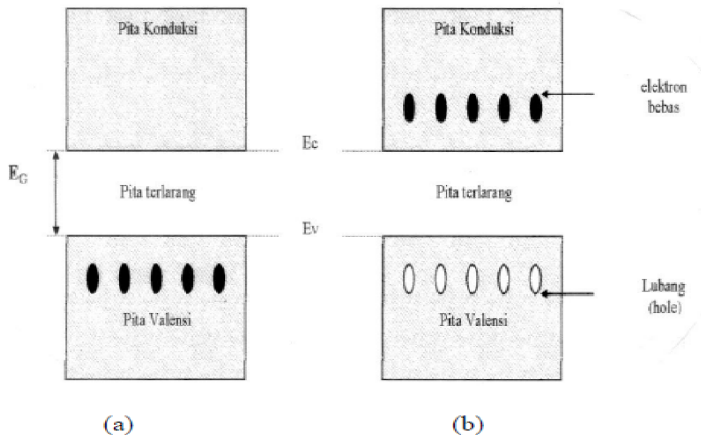
$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (2)$$

dengan E_c adalah energi pada pita konduksi, dan E_v adalah energi pada pita valensi.

Ciri-ciri yang menonjol pada semikonduktor intrinsik adalah:

- a. Jumlah elektron pada pita konduksi sama dengan jumlah elektron pada pita valensi.
- b. Energi Fermi terletak di tengah-tengah energi gap.

- c. Elektron memberikan sumbangan terbesar terhadap arus, tetapi sumbangan hole juga berperan penting.
- d. Ada sekitar 1 atom di antara 10⁹ atom yang memberikan sumbangan terhadap hantaran listrik. (Nyoman Suwitra, 1989: 222-227).



Gambar 9. Pita Energi Semikonduktor (a) Pada Suhu 0K dan (b) Pada Suhu di Atas 0K

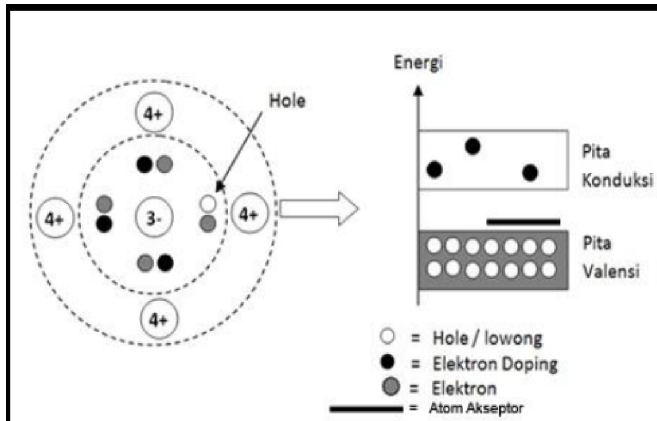
(Thomas Sri Widodo, 2002)

2. Semikonduktor Ekstrinsik

Semikonduktor ekstrinsik adalah semikonduktor yang sudah dicampuri sedikit ketidakmurnian (pengotor). Semikonduktor ekstrinsik lebih dikenal dengan semikonduktor tak murni. Kemampuan konduksi arusnya kecil dengan sifat kelistrikan yang dikendalikan oleh impuritas atau pengotor yang diberikan pada bahan itu (doping). Semikonduktor ekstrinsik terdiri dari dua tipe yaitu semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n.

a. Semikonduktor Tipe-p

Semikonduktor tipe-p dapat dibuat dengan menambahkan sejumlah kecil atom pengotor trivalen pada semikonduktor murni. Atom-atom pengotor (dopan) ini mempunyai tiga elektron valensi sehingga secara efektif hanya dapat membentuk tiga ikatan kovalen. Saat sebuah atom trivalen menempati posisi atom dalam kisi kristal, terbentuk tiga ikatan kovalen lengkap dan tersisa sebuah muatan positif dari atom silikon yang tidak berpasangan yang disebut lubang (hole). Material yang dihasilkan dari proses pengotoran ini menghasilkan pembawa muatan positif pada kristal yang netral. Karena atom pengotor (dopan) menerima elektron dari pita valensi, maka atom pengotor ini disebut sebagai atom aseptor (acceptor). Semikonduktor yang didoping dengan atom-atom akseptor ini dinamakan semikonduktor tipe-p (p-type semiconductor) di mana "p" adalah kependekan dari "positif" karena pembawa muatan positif jauh melebihi pembawa muatan negatif. Dalam semikonduktor tipe-p akan terbentuk tingkat energi yang diperbolehkan yang letaknya sedikit diatas pita valensi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 10. Oleh karena energi yang dibutuhkan elektron untuk meninggalkan pita valensi dan mengisi tingkatan energi akseptor kecil sekali, maka *hole-hole* yang dibentuk oleh elektron-elektron ini merupakan pembawa mayoritas di dalam pita valensi, sedangkan elektron pembawa minoritas di dalam pita valensi. Penambahan unsur-unsur dari golongan IIIA (B, Al, Ga, dan In) pada unsur-unsur golongan IVA menghasilkan semikonduktor tipe-p (Ahmad, 2013: 15).



Gambar 10. Tingkat Energi Semikonduktor Tipe-p
(Ariswan, 2008).

b. Semikonduktor Tipe-n

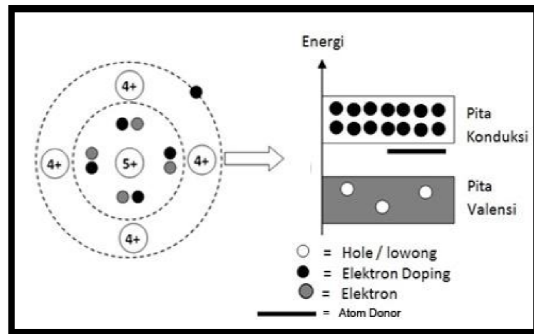
Semikonduktor tipe-n dapat dibuat dengan menambahkan sejumlah kecil atom pengotor pentavalen (atom bervalensi lima). Atom-atom pengotor (*dopan*) ini mempunyai lima elektron valensi sehingga secara efektif memiliki muatan sebesar $+5q$. Saat sebuah atom pentavalen menempati posisi atom dalam kristal, hanya empat elektron valensi yang dapat membentuk ikatan kovalen lengkap, dan tersisa sebuah elektron yang tidak berpasangan (Gambar 11). Dengan adanya energi *thermal* yang kecil saja, sisa elektron ini akan menjadi elektron bebas dan siap menjadi pembawa muatan dalam proses hantaran listrik. Material yang dihasilkan dari proses pengotoran ini disebut semikonduktor tipe-n karena menghasilkan pembawa muatan negatif dari kristal yang netral. Karena atom pengotor memberikan elektron, maka atom pengotor ini disebut sebagai atom donor. Semikonduktor ini terbentuk dengan menambahkan unsur-unsur golongan V (N, P, As, dan Sb) pada golongan IV (Si, Ge, Sn, dan Pb).

Perbedaan semikonduktor intrinsik dan semikonduktor tipe-n adalah pada semikonduktor intrinsik, terbentuknya elektron bebas

disertai lubang yang dapat bergerak sebagai pembawa muatan. Sedangkan pada semikonduktor tipe-n, terbentuknya elektron bebas tidak disertai lubang tetapi berbentuk ion positif yang tidak dapat bergerak.

Pada diagram tingkat energi semikonduktor tipe-n, tingkat energi elektron yang kehilangan ikatan ini muncul sebagai tingkat diskrit dalam energi gap tepat di bawah pita konduksi, sehingga energi yang diperlukan elektron ini untuk bergerak menuju pita konduksi menjadi sangat kecil. Dengan demikian, akan sangat mudah terjadi eksitasi pada suhu kamar. Tingkat energi elektron ini dinamakan energi donor (aras donor) dan elektron pengotor disebut donor karena elektron dengan mudah diberikan ke pita konduksi. Suatu semikonduktor yang telah didoping dengan pengotor donor dinamakan semikonduktor tipe-n atau negatif.

Apabila bahan semikonduktor intrinsik diisi dengan ketakmurnian tipe-n, maka banyaknya elektron akan bertambah dan jumlah hole berkurang daripada yang terdapat dalam semikonduktor intrinsik. Pada tipe ini, mayoritas pembawa muatan adalah elektron sedangkan hole merupakan pembawa minoritas. Berkurangnya hole ini disebabkan karena dengan bertambah banyaknya elektron maka kecepatan rekombinasi elektron dengan hole meningkat (Ahmad, 2013: 17).



Gambar 11. Tingkat Energi Semikonduktor Tipe-n
(Ariswan, 2008).

Mekanisme mengalirnya arus listrik pada semikonduktor disebabkan adanya arus drift dan arus difusi. Arus drift adalah arus yang disebabkan berjalannya partikel bermuatan karena adanya medan listrik. Kecepatan pembawa muatan tersebut sebanding dengan besarnya medan listrik yang diberikan. Kecepatan untuk sebuah elektron dan sebuah hole adalah:

$$\mathbf{v_n} = -\mu_n \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{v_p} = \mu_p \mathbf{E} \quad (4)$$

dengan dan adalah laju drift pada elektron dan hole (m/s), dan adalah mobilitas dari elektron dan hole (m²/V.s) sedangkan adalah medan listrik (V/m). Tanda negatif pada persamaan (3) menandakan bahwa kecepatan drift elektron berlawanan arah dengan medan listrik yang diberikan. Kecepatan drift ini sendiri lalu akan menghasilkan kerapatan arus drift untuk elektron dan hole yang besarnya adalah:

$$J_n = (-q)nv = q_n\mu_n\varepsilon$$

(5)

$$J_p = (+q)nv = q_p\mu_p\varepsilon$$

(6)

Dengan J adalah rapat arus (A/m^2), adalah mobilitas pembawa muatan ($m^2/V.s$), n adalah konsentrasi electron (m^{-3}) dan p adalah konsentrasi hole (m^{-3}). Arus difusi adalah arus yang disebabkan adanya perbedaan konsentrasi pembawa muatan dari satu titik ke titik yang lainnya. Arus akan mengalir tanpa adanya medan listrik internal dan gerakannya akan berhenti ketika konsentrasi partikel merata. Pada keadaan ini berlaku hukum difusi sebagai berikut:

$$J_p = -D \frac{dp}{dx}$$

(7)

Arus difusi yang dihasilkan akan sebanding dengan gradien konsentrasi pembawa muatan, sehingga persamaan difusi untuk elektron dan hole sebagai berikut :

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \tag{8}$$

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx} \tag{9}$$

Dengan J dan J_n adalah rapat arus (A/m^2), dn dan dp adalah konsentrasi pembawa muatan ($m^2/V.s$), dan D adalah koefisien difusi (m^2/s), serta x adalah posisi (m). Dengan demikian rapat arus total pada semikonduktor merupakan hasil penjumlahan dari arus hanyut dan arus difusi.

$$J_n = qn\mu_n\varepsilon + qD_n \frac{dn}{dx} \tag{10}$$

$$I_p = qn\mu_p \varepsilon - qD_p \frac{d_p}{d_x} \quad (11)$$

3. Karakterisasi Kristal

Penentuan karakter struktur material, baik dalam bentuk pejal atau partikel, kristalin atau mirip gelas merupakan salah satu kegiatan inti dari ilmu material (Smallman, 2000: 136). Dalam penelitian ini, karakterisasi kristal dilakukan dengan tiga (3) teknik, yaitu X-Ray Diffraction (XRD), Energy Dispersive Analysis X-Ray (EDAX) dan Scanning Electron Microscopy (SEM).

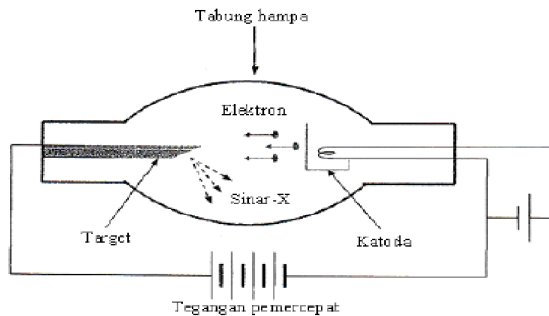
a. Analisis X-Ray Diffraction (XRD)

Teknik X-Ray Diffraction (XRD) berperan penting dalam proses analisis padatan kristal maupun amorf. Teknik XRD dapat digunakan untuk analisis struktur kristal karena setiap unsur atau senyawa memiliki pola tertentu. Apabila dalam analisis ini pola difraksi unsur diketahui, maka unsur tersebut dapat ditentukan. Metode difraksi sinar-X merupakan metode analisis kualitatif yang sangat penting karena kristalinitas dari material pola difraksi serbuk yang karakteristik, oleh karena itu metode ini disebut juga metode sidik jari serbuk (powder fingerprint method). Penyebab utama yang menghasilkan bentuk pola-pola difraksi serbuk tersebut, yaitu: (a) ukuran dan bentuk dari setiap selnya, (b) nomor atom dan posisi atom-atom di dalam sel (Smallman, 2000: 146-147).

Difraksi merupakan penyebaran atau pembelokan gelombang pada saat gelombang melewati penghalang. Sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang antara $0,5 \text{ \AA} - 2,5 \text{ \AA}$ dan memiliki energi foton antara $1,2 \times 10^3 \text{ eV} - 2,4 \times 10^5 \text{ eV}$ (Arifianto AS, 2009: 14) yang dihasilkan dari penembakan logam dengan elektron energi tertinggi. Dengan karakterisasi tersebut sinar-X mampu menembus zat padat sehingga dapat digunakan untuk menentukan struktur kristal. Hamburan sinar ini dihasilkan bila suatu elektron logam

ditembak dengan elektron-elektron berkecepatan tinggi dalam tabung hampa udara (Alkins, 1999: 169).

Peristiwa pembentukan sinar-X dapat dijelaskan yaitu pada saat menumbuk logam, elektron yang berasal dari katoda (elektron datang) menembus kulit atom dan mendekati kulit inti atom. Pada waktu mendekati inti atom, elektron ditarik mendekati inti atom yang bermuatan positif, sehingga lintasan elektron berbelok dan kecepatan elektron berkurang atau diperlambat. Karena perlambatan ini, maka energi elektron berkurang. Energi yang hilang ini dipancarkan dalam bentuk sinar-X. Proses ini terkenal sebagai proses bremsstrahlung.



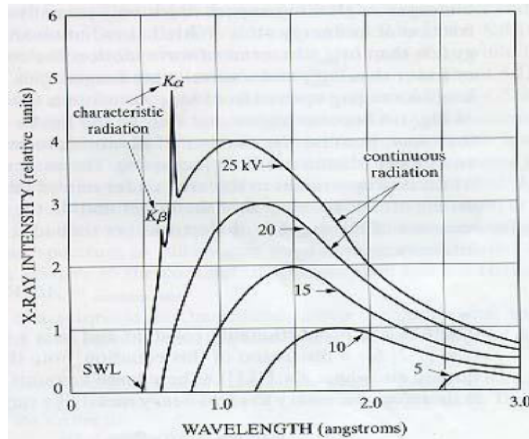
Gambar 12. Diagram Sinar-X
(Beiser, 1992: 62)

Gambar 12 menunjukkan bahwa, apabila logam ditembak dengan elektron cepat dalam tabung vakum, maka akan dihasilkan sinar-X. Radiasi yang dipancarkan dapat dipisahkan menjadi dua komponen, yaitu spektrum kontinu dengan rentang panjang gelombang yang lebar dan spektrum diskrit sesuai karakterisasi logam yang ditembak. Radiasi spektrum kontinu terjadi akibat perlambatan mendadak gerak electron dari katoda pada saat mendekati anoda akibat pengaruh gaya elektrostatika. Energi radiasi pada spektrum kontinu akan naik seiring

dengan bertambahnya nomor atom target dan berbanding lurus dengan kuadrat tegangan. Radiasi jenis ini terjadi jika elektron yang terakselerasi mempunyai cukup energi untuk mengeluarkan satu elektron dalam kulitnya dan kemudian akan diisi dengan elektron yang lain dari level energi yang lebih tinggi. Pada waktu transisi terjadi emisi radiasi sinar-X. Sebagai contoh, apabila kekosongan kulit-K diisi oleh elektron dari kulit-L yang mempunyai tingkat energi yang lebih tinggi maka radiasi ini disebut radiasi $K\alpha$ sehingga panjang gelombang dapat diperoleh dengan persamaan di bawah ini:

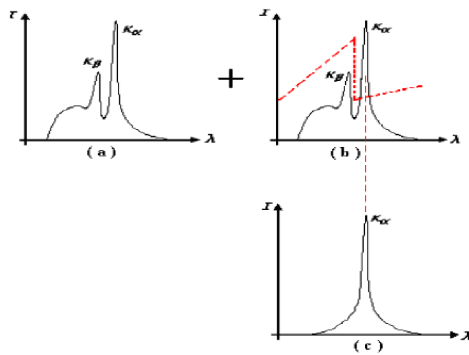
$$h\nu = E_L - E_K \quad (12)$$

tetapi apabila kekosongan kulit-K tersebut diisi oleh elektron dari kulit-M (kulit kuantum tertinggi berikutnya) maka radiasi emisinya disebut $K\beta$.



Gambar 13. Spektrum sinar-X molybdenum
(Sumber: Ariswan, 2010)

Pada Gambar 13 spektrum radiasi terlihat jelas bahwa terdapat lebih dari satu sinar-X karakteristik berarti sinar-X masih bersifat polikromatik. Hal ini terjadi karena adanya transisi antara tingkat energy yang berbeda. Untuk menganalisis struktur kristal dari bahan paduan dibutuhkan sinar-X yang monokromatik (hanya memiliki satu panjang gelombang) maka perlu dilakukan proses penyaringan menggunakan bahan penyaring (filter) yang sesuai, yaitu menggunakan logam bernomor atom lebih kecil dari target.

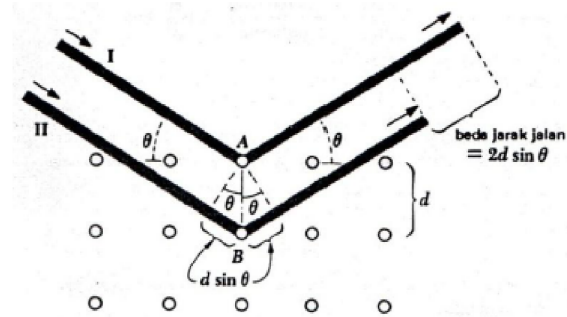


Gambar 14. Sinar-X Karakteristik
(Smallman, 1999: 153)

Gambar 14(a) menunjukkan spektrum sinar-X yang masih bersifat polikromatik, dengan karakteristik dari radiasi K_{α} lebih kuat dibandingkan dengan radiasi K_{β} (Smallman, 2000: 145-146). Gambar 14(b) adalah sinar-X yang masih bersifat polikromatik yang diberi filter yang tepat, yaitu dengan memilih bahan yang mempunyai nomor atom lebih kecil dari atom target yang merupakan sumber sinar-X. Gambar 14(c) sinar-X monokromatik setelah melalui penyaringan. Apabila suatu berkas sinar-X monokromatis dilewatkan pada suatu bahan maka akan terjadi penyerapan dan penghamburan berkas sinar oleh atom-atom dalam bahan tersebut. Berkas sinar-X yang jatuh akan dihamburkan ke

segala arah, tetapi karena keteraturan letak atom-atom, pada arah-arrah tertentu gelombang hampur itu akan berinterferensi konstruktif (mengalami penguatan), sedang yang lainnya akan mengalami interferensi destruktif (saling menghilangkan).

Berkas difraksi diperoleh dari berkas sinar-X yang mengalami interferensi konstruktif. Bragg menyatakan bahwa interferensi konstruktif hanya terjadi antar sinar terhambur dengan beda jarak lintasan tepat λ , 2λ , 3λ dan seterusnya (Edi Istiyono, 2000: 156). Rancangan skematik spektrometer sinar-X yang didasarkan pada analisis Bragg ditunjukkan pada Gambar 15. Seberkas sinar-X terarah jatuh pada kristal dengan sudut θ dan sebuah detektor diletakkan untuk mencatat sinar yang sudut hamburnya sebesar θ . Ketika θ diubah, detektor akan mencatat puncak intensitas yang bersesuaian dengan orde- n yang divisualisasikan dalam difraktogram.



Gambar 15. Difraksi Bragg
(Beiser, 1992: 68)

Gambar 15 menunjukkan seberkas sinar mengenai kisi pada bidang pertama dan pada bidang berikutnya. Jarak antara bidang kisi adalah d , sedangkan adalah sudut difraksi. Berkas-berkas tersebut mempunyai panjang gelombang λ dan jatuh pada bidang kristal dengan jarak d

dengan sudut θ . Agar mengalami interferensi konstruktif, kedua berkas tersebut harus memiliki beda jarak $n\lambda$. Beda jarak lintasan kedua berkas adalah $2d \sin \theta$. Persamaan ini dikenal dengan hukum Bragg. Pemantulan Bragg dapat terjadi jika dengan n adalah bilangan bulat (1, 2, 3,...).

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (13)$$

Arah berkas yang dipantulkan oleh atom dalam kristal ditentukan oleh geometri dari kisi kristal yang bergantung pada orientasi dan jarak bidang kristal. Penentuan orientasi kristal dilakukan dengan mengamati pola berkas difraksi sinar-X yang dipantulkan oleh kristal. Untuk XRD, pola difraksi diamati sebagai fungsi sudut 2θ . Pola difraksi yang terjadi kemudian dibandingkan dengan JCPDS sebagai data standar. Berikut adalah cara menentukan jarak antar bidang pada kristal dalam himpunan (hkl):

Tabel 2. Jarak Antar Bidang pada Tujuh Sistem Kristal
(Setyabudi, 2013)

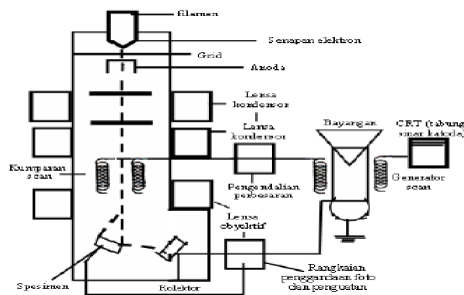
Sistem Kristal	Jarak antar bidang
Kubik	$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}$
Monoklinik	$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{\sin^2\beta} \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \sin^2\beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - 2 \frac{hl \cos\beta}{ac} \right)$
Triklinik	$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{v^2} (S_{11}h^2 + S_{22}k^2 + S_{33}l^2 + 2S_{12}hk + 2S_{23}kl + 2S_{13}hl)$
Tetragonal	$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}$
Orthorombik	$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}$
Rhombohedral	$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2)\sin^2\alpha + 2(hk + kl + hl)(\cos^2\alpha - \cos\alpha)}{a^2(1 - 3\cos^2\alpha + 2\cos^3\alpha)}$
Hexagonal	$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2}$

Dengan menggunakan persamaan pada jarak antar bidang kristal dan mensubstitusikan kedalam persamaan (13) maka akan diperoleh nilai parameter kisi kristal a , b , dan c . Cara ini disebut dengan metode *cohen* (lihat persamaan 14-17).

b. Analisis SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

SEM digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan bahan. Karakteristik bahan menggunakan SEM dimanfaatkan untuk melihat struktur topografi permukaan, ukuran butiran, cacat struktural dan komposisi pencemaran suatu bahan. Hasil yang diperoleh dari karakterisasi ini dapat dilihat secara langsung pada hasil SEM berupa *Scanning Electron Micrograph* yang menyajikan bentuk tiga dimensi

berupa gambar atau foto. Mikroskop ini digunakan untuk mempelajari struktur permukaan obyek, yang secara umum diperbesar antara 1.000-40.000 kali. Skema dasar SEM disajikan pada Gambar 18 sumber elektron dari filamen yang terbuat dari *tungsten* memancarkan berkas elektron. Jika elektron tersebut berinteraksi dengan bahan (*specimen*) maka akan dihasilkan elektron sekunder dan sinar-X karakteristik. *Scanning* pada permukaan bahan yang dikehendaki dapat dilakukan dengan mengatur *scanning generator* dan *scanning coils*. Elektron sekunder hasil interaksi antara elektron dengan permukaan bahan ditangkap oleh detektor kemudian diubah menjadi sinyal listrik. Sinyal listrik ini diperkuat oleh penguat (*amplifier*) yang kemudian divisualisasikan dalam monitor sinar katoda (*CRT*) (Ahmad, 2013: 32-33).



Gambar 16. Skema Dasar SEM.

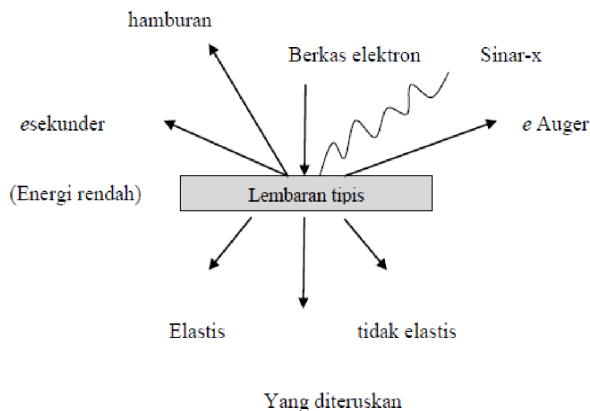
(Smallman, 2000: 157)

c. Analisis EDAX (*Energy Dispersive Analysis X-Ray*)

EDAX merupakan instrumen yang digunakan untuk menentukan komposisi kimia suatu bahan. Sistem analisis EDAX bekerja sebagai fitur yang terintegrasi dengan SEM dan tidak dapat bekerja tanpa SEM. Prinsip kerja dari teknik ini adalah menangkap dan mengolah sinyal *fluoresensi* sinar-X yang keluar apabila berkas elektron mengenai daerah tertentu pada bahan (*specimen*). Sinar-X tersebut dapat

dideteksi dengan detektor zat padat, yang dapat menghasilkan pulsa intensitas sebanding dengan panjang gelombang sinar-X.

Struktur suatu material dapat diketahui dengan cara melihat interaksi yang terjadi jika suatu *specimen* padat dikenai berkas elektron. Berkas elektron yang jatuh tersebut sebagian akan dihamburkan sedang sebagian lagi akan diserap dan menembus *specimen*. Bila *specimen*-nya cukup tipis, sebagian besar ditransmisikan dan beberapa elektron dihamburkan secara elastis tanpa kehilangan energi, sementara sebagian lagi dihamburkan secara tidak elastis. Interaksi dengan atom dalam *specimen* menghasilkan pelepasan elektron energi rendah, foton sinar-X dan elektron auger, yang semuanya dapat digunakan untuk mengkarakterisasi material (Ariswan, 2010).



Gambar 17. Hamburan dari Elektron yang Jatuh pada Lembaran Tipis (Smallman, 2000: 155).

Gambar 17 menunjukkan hamburan elektron-elektron ketika mengenai spesimen. Interaksi antara elektron dengan atom pada sampel akan menghasilkan pelepasan elektron energi rendah, foton sinar-X dan elektron auger bisa digunakan untuk mengkarakterisasi

material (Smallman, 2000: 156). Elektron sekunder adalah elektron yang dipancarkan dari permukaan kulit atom terluar yang dihasilkan dari interaksi berkas elektron jatuh mengenai spesimen padat sehingga mengakibatkan terjadinya loncatan elektron yang terikat lemah dari pita konduksi. Elektron Auger adalah elektron dari kulit orbit terluar yang dikeluarkan dari atom ketika elektron tersebut menyerap energi yang dilepaskan oleh elektron lain yang jatuh ke tingkat energi yang lebih rendah.

Apabila berkas elektron mengenai sampel padat, maka sebagian berkas yang jatuh tersebut akan dihamburkan kembali dan sebagian lagi akan menembus sampel. Untuk sampel yang tipis maka sebagian besar elektron akan diteruskan, beberapa elektron akan dihamburkan secara elastis tanpa kehilangan energi dan sebagian lagi akan dihamburkan secara tak elastis (Smallman dan Bishop, 2000: 155-156).

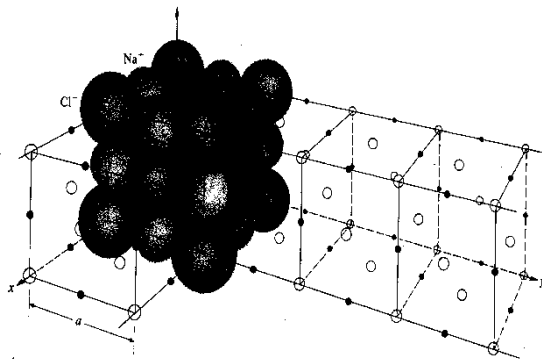
Teknik ini juga dapat dimanfaatkan untuk mengamati unsur-unsur pada daerah kecil permukaan bahan secara kualitatif dan semi kuantitatif. Hal ini karena masing-masing unsur menyebar pada panjang gelombang spesifik. Jika teknik SEM dan EDAX digabungkan maka keduanya dapat dimanfaatkan untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang terlihat pada struktur mikro (Prakit Wiyantoko, 2009: 34).

K r i s t a l

Semua logam, sebagian besar keramik dan beberapa polimer membentuk kristal ketika bahan tersebut membeku. Dengan ini dimaksudkan bahwa atom-atom mengatur diri secara teratur dan berulang dalam pola tiga dimensi. Struktur semacam ini disebut kristal. Pola teratur dalam jangkauan panjang yang menyangkut puluhan jarak atom dihasilkan oleh koordinasi atom dalam bahan. Disamping itu pola ini kadang-kadang menentukan pula bentuk luar dari kristal, contoh

yang dapat dikemukakan adalah bentuk bintang enam bunga salju. Permukaan datar batu-batu mulia, *kristal kwarsa* (SiO_2). Dalam setiap contoh yang dikemukakan tadi, pengaturan atom didalam kristal tetap ada meskipun meskipun bentuk permukaan luarnya diubah.

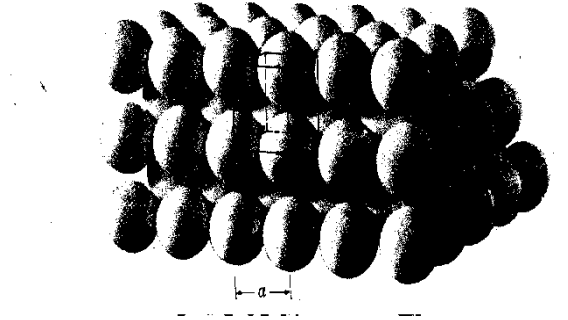
Sel satuan. Tata jangkau panjang yang merupakan karakteristik kristal dapat dilihat pada gambar 3.1. Model ini memperlihatkan beberapa pola atom kisi yang dapat terjadi bila terdapat satu jenis atom. Karena pada pola ini terulang secara tak terhinga, untuk mudahnya kisi kristal ini dibagi dalam sel satuan. Sel satua ini yang mempunyai volume terbatas, dengan ciri-ciri yang sama dengan kristal secara keseluruhan.



Gambar 2.1. Struktur kristal NaCl

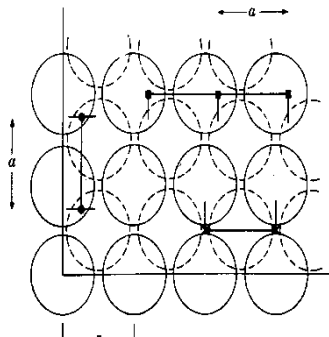
Jarak yang selalu berulang disebut juga konstanta kisi, dalam pola jangkau panjang kristal, menentukan ukuran sel satuan, jadi dimensi yang berulang atau (lihat gambar 3.2) juga merupakan dimensi sel satuan. Karena pola kristal identik dalam ketiga arah tegak lurus, sel

satuan ini berbentuk kubik dan a konstanta kisi dalam ketiga arah koordinat. Dalam kristal bukan kubik, konstanta kisi berbeda dalam ketiga arah koordinat.



Gambar 2.2. Sel satuan

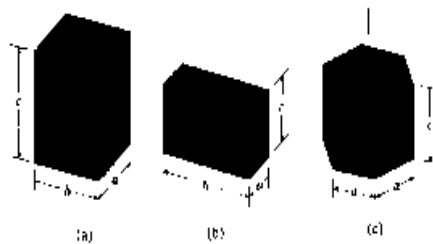
Titik sudut sel satuan dapat ditempatkan dimana saja dalam suatu kristal. Jadi sudut tersebut dapat berada dipusat atom, tempat lain dalam atom-atom atau diantara atom-atom. Setiap sel mempunyai ciri-ciri geometrik yang sama dengan kristal keseluruhan.



Gambar 2.3. Konstanta kisi

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

Kristal bukan kubik terjadi bila pola ulangnya tidak sama dalam ketiga arah koordinatnya atau sudut antara ketiga sumbu kristal tidak sama dengan 90° . Ada tujuh sistem kristal, dengan karakteristik geometriaknya dapat diketahui seperti berikut : *Kubik, Tetragonal, Ortorombik, Monoklinik, Triklinik, Hexagonal dan Rombohedral.*

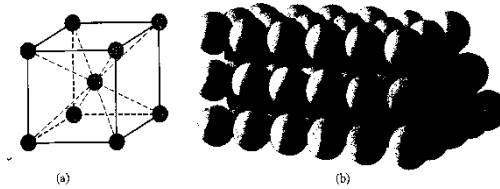


Gambar 2.4 Kristal bukan kubik (a) Tetragonal. (b) Ortorombik, (c) Hexagonal

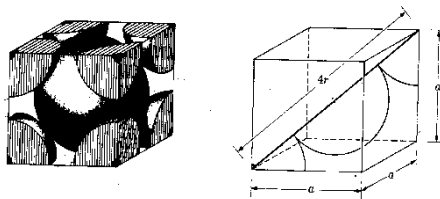
3.2. Kisi kubik

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

Logam kubik pemusatan ruang. Besi mempunyai struktur kubik. Pada suhu ruang sel satuan besi mempunyai atom pada tiap titik sudut kubus dan satu atom pada pusat kubus (gambar 3.4). Besi merupakan logam yang paling umum digunakan dengan struktur kubik pemusatan ruang, tetapi bukan satu-satunya.



Gambar 2.5. Struktur kubik pemusatang ruang



Gambar 2.6 Sel satuan kubik pemusatang ruang

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

Sel satuan logam kpr mempunyai dua atom, satu atom dipusat kubus dan delapan seperdelapan atom pada delapan titik sudutnya. Dalam logam antara konstanta kisi a dan jari-jari atom R terdapat hubungan sebagai berikut.

$$(a_{\text{kpr}})_{\text{logam}} = \frac{4R}{\sqrt{3}}$$

2.1

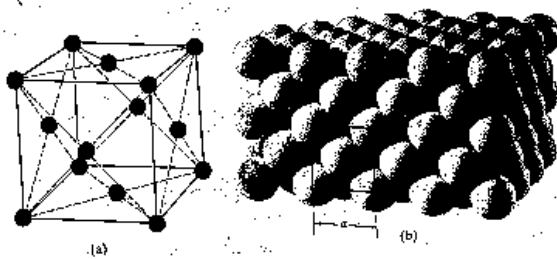
Kita dapat menerapkan konsep *tumpukan atom (FT)* pada logam kpr, dengan menggunakan model bola keras maka fraksi volum dari sel satuan yang ditempati oleh bola-bola tersebut.

Faktor tumpukan = Volume atom/Volume sel satuan 2.2

Karena dalam sel satuan logam kpr terdapat dua buah atom

$$FT = \frac{2[4\pi R^3/3]}{a^3} \quad 2.3$$
$$= \frac{2[4\pi R^3/3]}{[4R/\sqrt{3}]^3} = 0,68$$

Logam kubik pemustan sisi. Pengaturan atom dalam tembaga (gambar 2.7) tidak sama dengan pengaturan atom dalam besi, meski keduanya kubik. Disamping atom pada setiap titik sudut sel satuan tembaga, terdapat sebuah atom ditengah setiap bidang permukaan, namun tak satupun dititik pusat kubus. *Struktur kubik pemustan sisi (kps)* ini lebih sering dijumpai pada logam antara lain, *Aluminium tembaga* dan lain-lain.



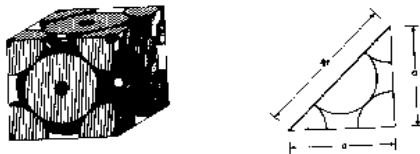
Gambar 2.7 Struktur kubik pemustan sisi

Logam dengan struktur kps mempunyai empat kali lebih banyak atom. Ke delapan atom pada titik sudut menghasilkan satu atom, dan keenam

bidang sisi menghasilkan 3 atom persel satuan (gambar 3.7). Dalam logam, hubungan antara konstanta kisi a dengan jari-jari R dinyatakan dalam persamaan :

$$(a_{\text{kpr}})_{\text{logam}} = \frac{4R}{\sqrt{2}} \quad 3.4$$

Dari persamaan diatas dapat diketahui bahwa faktor tumpukan logam kps adalah *0,74 yang ternyata lebih besar dari nilai 0,68 untuk logam kpr.*



Gambar 2.8 Sel satuan kubik pemusatan sisi (logam)

SOAL-SOAL

1. Sel satuan Cr adalah kubik yang mempunyai dua atom. Tentukan berapa jari-jari Cr ?, bila diketahui densitas Cr = 7,2 Mgram/m³, Berat Atom Cr = 52.
2. Tembaga mempunyai struktur FCC dengan panjang jari-jari 0,1278 nm. Berapa densitas Cu ? Bandingkan nilainya dengan yang ada di lampirkan.
3. Seperti no. 2, namun atomnya Aluminum dengan struktur kristal FCC.
4. Seperti no. 1, namun logamnya adalah natrium.

BAB 3: DIAGRAM *PHASE*

CAPAIAN PEMBELAJARAN

Diharapkan mahasiswa dapat memahami dan mengerti bahwa diagram *phase* adalah diagram yang menjelaskan tentang bagaimana cara pembuatan bahan dengan menggunakan cara pengecoran.

3.1 Diagram Phase

Telah diketahui bahwa banyak macam struktur yang mungkin terjadi pada suatu paduan. Karena sifat suatu bahan banyak tergantung pada *jenis, jumlah/banyaknya dan bentuk* dari fase yang terjadi, maka sifat akan berubah bila hal-hal diatas berubah. Karena itu perlu diketahui dari suatu paduan pada kondisi bagaimana suatu fase dapat terjadi dan pada kondisi bagaimana suatu perubahan fase akan terjadi.

Sejumlah besar data mengenai perubahan fase dari berbagai sistem paduan telah dikumpulkan dan dicatat dalam bentuk diagram yaitu *diagram fase*, atau dikenal juga sebagai *diagram keseimbangan* atau *diagram ekuilibrium*.

Suatu diagram fase, idealnya akan menggambarkan hubungan antara fase, komposisi dan temperatur, pada kondisi keseimbangan (ekuilibrium, yaitu kondisi dimana tidak terjadi perubahan yang bergantung pada waktu). Kondisi ekuilibrium dapat didekati dengan pemanasan dan pendinginan yang sangat lambat, sehingga bila ada perubahan fase yang harus terjadi maka akan tersedia waktu yang cukup untuk mencapai kondisi keseimbangan.

Diagram fase ada berbagai macam, diagram fase untuk suatu sistem paduan yang terdiri dari dua komponen dinamakan diagram biner, terner untuk yang tiga komponen, dst. Yang biasa dipergunakan adalah diagram biner, diagram terner jarang digunakan karena datanya sulit didapat dan diagramnya sendiri cukup sulit untuk dapat dipergunakan.

Perubahan fase (transformasi) dapat terjadi dari fase cair ke padat atau sebaliknya dan dari fase padat ke padat. Ada beberapa jenis reaksi yang dapat terjadi pada setiap transformasi. Transformasi dengan reaksi yang sama akan mempunyai bentuk diagram fase yang sama.

Pada transformasi cair – padat ada beberapa kemungkinan dapat terjadi pada paduan:

1. Kedua komponennya tetap larut tak terbatas pada keadaan padat.

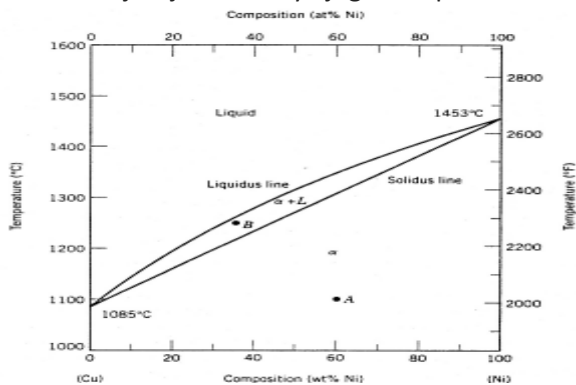
2. Kedua komponen saling tidak melarutkan pada keadaan padat (tidak membentuk larutan padat), terjadi reaksi eutektik.
3. Kedua komponen dapat saling melarutkan secara terbatas pada keadaan padat.
4. Kedua komponen mengalami reaksi peritektik.

Pada keadaan padat mungkin juga sudah tidak lagi ada perubahan fase, tetapi pada beberapa sistem paduan dapat terjadi transformasi padat-padat, antara lain:

1. Transformasi allotropi.
2. Reaksi eutektoid.
3. Reaksi peritektoid.

3.2 Diagram Fase 2 Komponen Yang Larut Padat Tak Terbatas (*Solid Solution*)

Dalam hal ini kedua komponen paduan bisa membentuk larutan baik pada fase cair maupun padat dengan segala komposisi. Maka satu-satunya kemungkinan adalah bahwa larutan padatnya adalah larutan padat substitusional. Kedua komponen harus memiliki bentuk kristal yang sama dan jari-jari atomnya juga hampir sama.



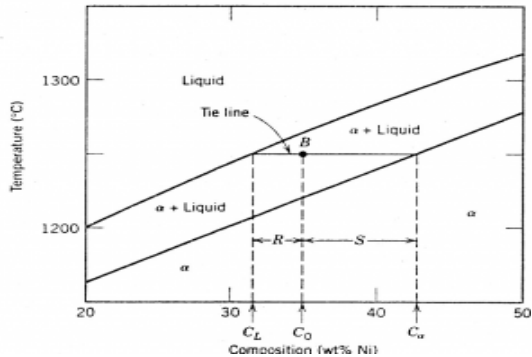
Gambar 3.1 Gambar diagram *phase*

Untuk membuat diagram fasenya diambil satu seri paduan dari kedua komponen tersebut, mulai dari A 100%, B 0% (A murni) sampai A 0%, B 100% (B murni). Semua contoh paduan masing-masing dipanaskan sampai mencair. Kemudian didinginkan sangat lambat dan diamati perubahan fase yang terjadi selama pendinginan.

Pada diagram fase daerah di atas garis liquidus adalah daerah fase larutan cair (liquid solution) dan daerah di bawah garis solidus adalah daerah larutan padat (solid solution). Daerah di antara kedua garis tersebut adalah daerah 2 fase yaitu larutan cair dan larutan padat. Larutan padat biasanya diberi nama dengan huruf Yunani, a, b, d, g dsb. Dari suatu diagram fase dapat diketahui :

- Fase/struktur apa yang akan terjadi pada suatu paduan dengan komposisi tertentu pada suatu temperatur tertentu.
- Komposisi kimia suatu fase dari suatu paduan tertentu pada temperatur tertentu.
- Perbandingan berat dari fase-fase yang ada pada suatu paduan dengan komposisi tertentu pada temperatur tertentu.

Untuk mencari komposisi kimia suatu fase pada temperatur tertentu, ditarik garis mendatar dari temperatur yang dimaksud hingga memotong garis batas daerah fase yang diamati. Garis ini dinamakan *tie line*.



Gambar 3.2 Perhitungan komposisi pada diagram *phase*

Perbandingan berat antara larutan cair dan larutan padat yang ada pada paduan 35%Ni, 65% Cu pada temperatur 1250°C ditunjukkan oleh perbandingan panjang penggal garis R dan S. Panjang R (sebelah kiri) menunjukkan berat fase padat (sebelah kanan), dan panjang S (sebelah kanan) menunjukkan berat fase cair (sebelah kiri).

Berat fase cair (persen) = $S/(S + R) \times 100\%$

Berat fase padat (persen) = $R/(S + R) \times 100\%$

Panjang R = $C_0 - C_L = 35 - 31,5 = 3,5$

Panjang S = $C_a - C_0 = 42,5 - 35 = 7,5$

Panjang R dan S = $C_a - C_L = 42,5 - 31,5 = 11$

Berat fase padat = $3,5/11 \times 100\% = 32\%$

Berat fase cair = $7,5/11 \times 100\% = 68\%$

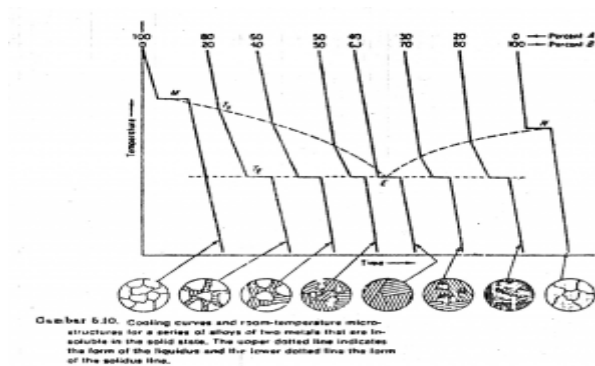
Prinsip – prinsip ini dinamakan *tie line rule* dan *lever rule*. Kedua prinsip ini berlaku pada semua jenis diagram fase.

3.3 Diagram Fase Untuk 2 Komponen Yang Saling Tidak Melarut Padatkan.

Hukum Raoult menyatakan bahwa titik beku suatu zat murni akan menurun bila ditambahkan zat lain, asalkan zat lain itu dapat larut

dalam keadaan cair, tetapi tidak larut dalam keadaan padat (tidak larut padat). Banyaknya penurunan titik beku ini sebanding dengan berat molekul zat terlarut.

Diagram fase sistem paduan untuk 2 komponen yang saling melarutkan pada keadaan cair tetapi sama sekali tidak saling melarutkan dalam keadaan padat ini dapat dibuat dari sejumlah kurva pendinginan dari satu seri paduan, analog dengan cara pembuatan diagram fase dari sistem terdahulu.



Gambar 3.3 Diagram fase sistem paduan untuk 2 komponen

Dalam keadaan murni logam A dan B membeku pada satu temperatur tertentu (terlihat kurva pendinginannya menunjukkan garis mendatar pada titik bekunya). Bila B ditambahkan pada logam A, titik awal pembekuan akan menurun, demikian juga bila A ditambahkan pada logam B, titik awal pembekuan juga turun. Karena masing-masing saling menyebabkan penurunan titik awal pembekuan, maka garis yang menunjukkan awal pembekuan (garis liquidus) akan memperlihatkan suatu minimum, yaitu pada titik E. Yang disebut **titik eutektik**. Paduan dengan komposisi ini dinamakan paduan dengan komposisi eutektik. Pembekuan akan berlangsung terus bersama dengan turunnya temperatur. Akhir pembekuan terjadi pada temperatur yang sama untuk semua komposisi paduan, temperatur ini

dinamakan *temperatur eutektik*. Tampak bahwa garis solidus berupa suatu garis lurus mendatar. Dapat pula disimpulkan bahwa paduan dengan komposisi eutektik akan membeku pada satu temperatur tertentu, seperti halnya logam murni.

3.4 Diagram fase untuk 2 komponen dengan kelarutan padatan terbatas.

Sebenarnya jarang sekali terjadi paduan antara 2 logam yang sama sekali saling tidak melarutkan dalam keadaan padat, atau saling melarutkan dalam kelarutan tak terbatas, seperti halnya pada kedua jenis sistem paduan yang terdahulu. Yang lebih sering terjadi adalah kedua logam dapat saling melarut padatkan secara terbatas, logam A dapat melarutkan logam B sampai jumlah tertentu, dan logam B dapat melarutkan logam A sampai jumlah tertentu juga. Diluar batas tersebut akan terbentuk eutektik. Diagram fase untuk sistem paduan semacam itu dapat dilihat pada gambar berikut.

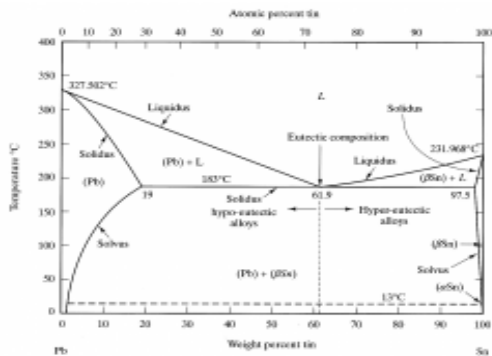
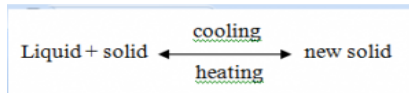


Fig. 5-12 The lead (Pb)-tin (Sn) binary diagram exhibiting partial solubilities one element in the other element.

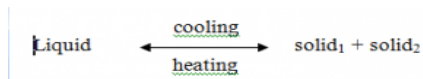
Gambar 3.4 Diagram fase untuk 2 komponen dengan kelarutan padatan terbatas

Reaksi Peritektik

Pada pembahasan di atas telah dibicarakan mengenai reaksi eutektik, reaksi yang terjadi pada liquid dari komposisi eutektik, yang secara umum dapat dituliskan sebagai:



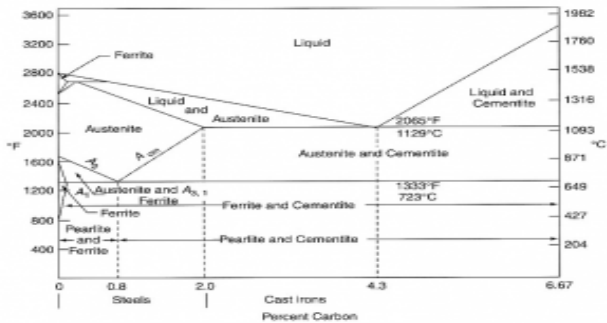
Pada reaksi eutektik itu pada pendinginan liquid (satu fase) mengalami reaksi menjadi 2 fase solid, pada pemanasan kedua solid bereaksi menjadi liquid (satu fase). Hal sebaliknya terjadi pada reaksi peritektik. Pada reaksi peritektik 2 fase yang berbeda (liquid dan suatu solid) bereaksi menjadi suatu solid baru dan dapat dituliskan sebagai berikut:



Reaksi peritektik juga berlangsung pada temperatur konstan (isothermal) seperti halnya reaksi eutektik.

3.5 Diagram Keseimbangan Besi – Karbida Besi (Fe – Fe₃C)

Besi dikenal sebagai salah satu logam yang memiliki sifat allotropi, memiliki bentuk lattice yang berbeda pada temperatur berbeda.



Gambar 3.5 Diagram Keseimbangan Besi – Karbida Besi (Fe – Fe₃C)

Besi memiliki 3 macam modifikasi allotropi.
 Pada temperatur :

1535°C : Besi murni cair yang didinginkan, akan mulai membeku menjadi besi delta (δ) dengan struktur BCC.

1400°C : Mengalami transformasi menjadi besi gamma (γ) dengan struktur FCC.

910°C : Terjadi transformasi allotropi menjadi besi alpha (α) non magnetik dengan struktur BCC.

768°C : Terjadi perubahan menjadi besi alpha (α) magnetik.

Pada setiap kali terjadi perubahan ditandai dengan adanya pemberhentian penurunan temperatur, berarti bahwa perubahan fase berlangsung secara isothermal.

Masing-masing bentuk allotropi besi ini mempunyai kemampuan melarutkan karbon yang berbeda-beda :

- Besi delta (δ) mampu melarutkan karbon sampai maksimum $\pm 0,10\%$ pada $\pm 1500^\circ$
- Besi gamma (γ) mampu melarutkan karbon sampai maksimum $\pm 2,0\%$ pada $\pm 1130^\circ$
- Besi alpha (α) mampu melarutkan karbon sampai maksimum $\pm 0,025\%$ pada $\pm 723^\circ$

Secara garis besar sistem paduan besi-karbon dapat dibedakan menjadi dua yaitu baja dan besi tuang. Nama/istilah yang terdapat pada diagram fase besi-karbida besi dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. *Cementite* adalah karbida besi Fe_3C , merupakan senyawa interstisial mengandung 6,67%C. Sangat keras (± 650 BHN) dan getas .
2. *Austenite* adalah larutan padat karbon dalam besi γ. Kekuatan tarik ± 1050 kg/cm², kekerasan 40 HRC, ketangguhan tinggi. Biasanya tidak stabil pada temperatur kamar.
3. *Ledeburite* adalah suatu eutectic mixture dari austenit dan cementite, mengandung 4,3%C, terbentuk pada 1130°
4. *Ferrite* adalah larutan padat karbon dalam besi α. Kelarutan karbon hanya 0,008% pada temperatur kamar. Kekuatan

rendah tetapi keuletan tinggi, kekerasan kurang dari 90 HRB.

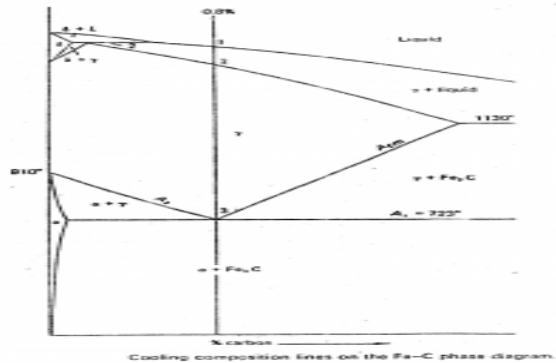
5. *Pearlite* adalah suatu eutektoid mixture dari cementit dan ferrit. Mengandung 0,8%C terbentuk pada 723°
6. *Lower Critical Temperature* (temperatur kritis bawah) A_1 , temperatur eutektoid. Pada diagram Fe-Fe₃C tampak garis mendatar pada temperatur 723° Pada temperatur ini terjadi reaksi eutektoid:
7. *Upper Critical Temperature* (temperatur kritis atas) A_3 , temperatur awal terjadinya perubahan allotropi dari g ke a (pada pendinginan) atau akhir perubahan allotropi dari a ke g (pada pemanasan).
8. Garis solvus A_{cm} merupakan batas kelarutan karbon dalam austenit.

Dengan menggunakan diagram keseimbangan memang mungkin dapat diramalkan struktur yang akan terjadi pada suatu paduan (asalkan pada kondisi ekuilibrium atau yang dapat dianggap ekuilibrium), dengan demikian juga akan dapat diramalkan sifatnya.

Paduan besi – karbon sangat luas penggunaannya, karena itu perlu pengetahuan yang lebih terinci tentang diagram fasenya. Untuk itu berikut akan dibahas mengenai transformasi pada paduan besi-karbon ini pada pendinginan lambat, yaitu baja eutektoid, baja hypoeutektoid, dan baja hypereutektoid.

3.6 Transformasi pada baja eutektoid (0,80 %C)

Baja eutektoid, paduan besi-karbon dengan kadar C = 0,80%, adalah paduan dengan komposisi eutektoid. Pada temperatur di atas garis liquidus berupa larutan cair (liquid). Bila temperatur diturunkan secara perlahan, pada saat mencapai garis liquidus (titik 1) akan mulai terbentuk inti austenit yang selanjutnya akan tumbuh menjadi dendrit austenit. Pembekuan selesai pada garis solidus (titik 2).



Gambar 3.6 Tranformasi pada baja eutektoid (0,80 %C)

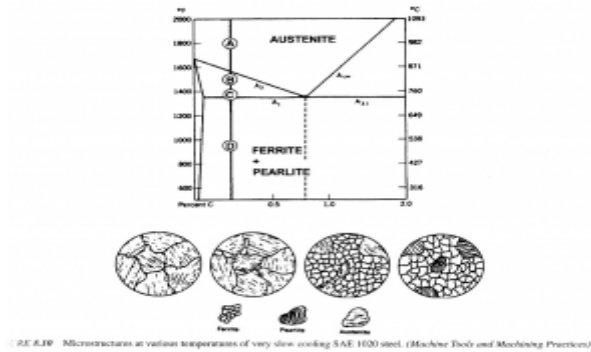
Seluruhnya sudah menjadi austenit. Pada pendinginan selanjutnya tidak terjadi perubahan hingga temperatur mencapai titik 3, di garis A₁, temperatur kritis bawah. Disini austenit yang mempunyai komposisi eutektoid ini akan mengalami reaksi eutektoid:

austenit → ferrit + sementit
(pearlit)

Terbentuknya pearlit ini dimulai dengan terbentuknya inti sementit (biasanya pada batas butir austenit).

3.7 Tranformasi pada baja hypoeutektoid (%C < 0,80)

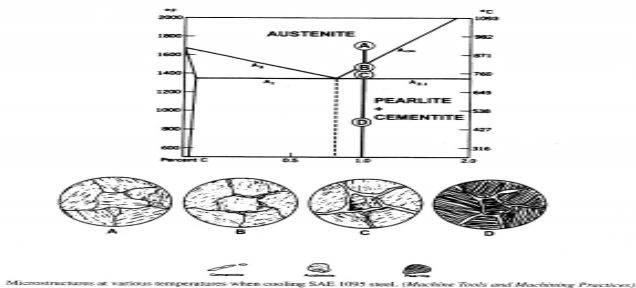
Sebagai contoh untuk pembahasan pada baja hypoeutektoid ini diambil baja dengan komposisi 0,20%C. Pada titik A mikrostruktur seluruhnya berupa asutenit. Setelah melewati garis A₃ (titik B), ferrit mulai terbentuk sepanjang batas butir austenit. Pada titik C austenit telah banyak menjadi ferrit, sedang austenit yang masih tersisa memiliki kadar karbon 0,8%. Setelah melewati garis A₁ austenit yang masih tersisa berubah menjadi pearlit. Sehingga pada titik D strukturmikro yang terjadi berupa ferrit dan pearlit .



Gambar 3.7 Tranformasi pada baja hypoeutektoid ($\%C < 0,80$)

3.8 Tranformasi pada baja hypereutektoid ($0,80 < \%C < 2,0$)

Pada titik A strukturmikro seluruhnya berupa austenit. Garis A_{cm} pada titik B menunjukkan dimana cementit mulai terbentuk dan akan terus bertambah banyak sampai titik C. Cementit yang mengendap pada batas butir austenit tidak membentuk butiran seperti halnya ferrit, tetapi hanya mengumpul pada batas butir dan menyelubungi butir austenit. Karena itu cementit seperti ini dinamakan *cementit network*. Setelah melewati garis A_1 austenit yang tersisa berubah menjadi pearlit. Sehingga struktur akhir yang terbentuk berupa cementit dan pearlit.

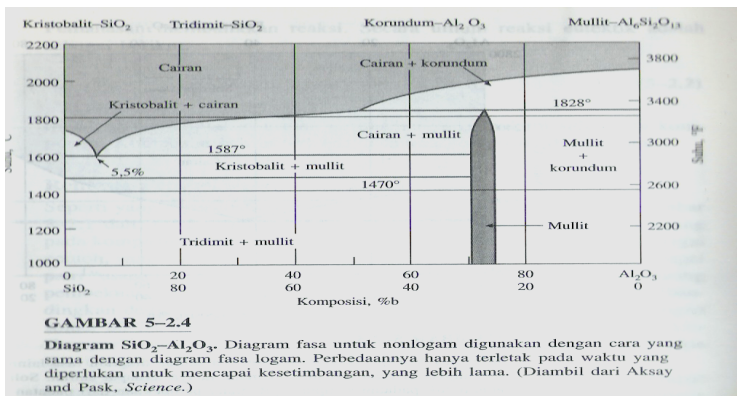


Gambar 3.8 Tranformasi pada baja hypereutektoid ($0,80 < \%C < 2,0$)

SOAL-SOAL

- Perhatikan diagram fase kuningan (brass).
 - Tunjukkan garis solidus dan likuidus
 - Pada temperatur/suhu isothermal 400 °C, tunjukkan fase-fase apa yang terjadi (dengan aturan 1-2-1-2-...).
 - Dilakukan pembuatan kuningan dengan cara pengecoran dengan komposisi 74% berat Zn dan 26% Cu. Saat suhu diturunkan dari suhu 1000 °C sampai dengan suhu kamar, fase-fase apa saja yang terjadi.

2.



Apabila untuk membuat bahan keramik lantai dengan komposisi 40% Al_2O_3 - 60% SiO_2 , dilebur pada suhu 1828°C dan didinginkan perlahan-lahan untuk tetap mempertahankan kesetimbangan. Pertanyaannya:

- Pada interval suhu berapa mulai timbul padatan?
- Pada suhu berapa seluruhnya menjadi padat (Kristobalit + mullit)

- c. Pada suhu berapa seluruhnya menjadi padat (Tridimit + mullit) ?
- d. Tunjukkan suhu Isotermal/Isotermis, dan fase-fase apa saja yang terjadi ?
- e. Pada komposisi 5,5% Al_2O_3 , fase-fase apa saja yang terjadi ?
- f. Pada komposisi 40% Al_2O_3 - 60% SiO_2 dan suhu 500 °C, fase apa yang terjadi.

BAB 4: SIFAT MEKANIK BAHAN DAN PENGUJIAN MERUSAK (*DESTRUCTIVE*)

CAPAIAN PEMBELAJARAN

Diharapkan mahasiswa dapat mengerti isi dari bab ini khususnya tentang sifat mekanik bahan serta pengujiannya yang bersifat merusak seperti uji tarik, uji dampak dan lainnya.

4.1 Sifat Mekanik

Ilmu logam adalah ilmu mengenai bahan-bahan logam dimana ilmu ini berkembang bukan berdasarkan teori saja melainkan atas dasar pengamatan, pengukuran dan pengujian.

Pengujian bahan logam saat ini semakin meluas baik dalam konstruksi, permesinan, bangunan, maupun bidang lainnya. Hal ini disebabkan karena sifat logam yang bisa diubah, sehingga pengetahuan tentang metalurgi terus berkembang.

Untuk mengetahui kualitas suatu logam, pengujian sangat erat kaitannya dengan pemilihan bahan yang akan dipergunakan dalam konstruksi suatu alat, selain itu juga bisa untuk membuktikan suatu teori yang sudah ada ataupun penemuan baru dibidang metalurgi.

Dalam proses perencanaan, dapat juga ditentukan jenis bahan maupun dimensinya, sehingga apabila tidak sesuai dapat dicari penggantinya yang lebih tepat. Disamping tidak mengabaikan faktor biaya produksi dan kualitasnya.

Adapun pengujian yang akan kita bahas, yaitu:

1. Uji Tarik
2. Uji Tekan
3. Uji Bengkok (Bending)
4. Uji Puntir
5. Uji Pukul Takik (Impact)
6. Uji Kekerasan

Pengujian Tarik (Tensile Test)

Tensile test adalah pengujian kekuatan suatu material dengan menarik suatu bahan sampai putus. Pada tensile test suatu material akan mengalami kerusakan, karena tensile test adalah pengujian kekuatan material dengan menarik suatu material sampai putus. Jadi material yang ditest kekuatannya akan rusak.

Pengujian Tekan (Compressed Test)

Pada uji tekan umumnya kekuatan tekan lebih tinggi dari kekuatan tarik. Suatu material akan ditekan dan saat pengujian ini material akan rusak. Prosesnya material akan ditaruh diatas landasan dan ditekan dari atas. Baru-baru ini telah ditemukan bahan yang baik terbuat dari keramik sebagai landasan dari silica, yang memberi pengaruh baik.

Pengujian Bengkok (Bending Test)

Pengujian bengkok adalah salah satu cara pengujian yang dipakai sejak lama bagi bahan yang cocok, karena dapat dilakukan terhadap batang uji berbentuk sederhana dan tidak perlu menggunakan mesin uji.

Pengujian Puntir (Torsion Test)

Pada pengujian puntiran suatu material akan rusak karena material tersebut akan mengalami patahan. Umumnya ini terjadi pada material yang getas, sedangkan pada material yang ulet patahan terjadi pada sudut tegak lurus terhadap sumbu puntiran setelah gaya pada arah sumbu terjadi dengan deformasi yang besar.

Uji impact (Pukul Takik)

Uji impact dilakukan untuk menentukan kekuatan material sebagai sebuah metode uji impact digunakan dalam dunia industri khususnya uji impact charpy dan uji impact izod. Dasar pengujian ini adalah penyerapan energy potensial dari beban yang mengayun dari suatu ketinggian tertentu dan menumbuk material uji sehinggaterjadi deformasi

Pengujian Kekerasan

Kekerasan suatu bahan didefinisikan sebagai ketahanan suatu bahan terhadap penetrasi material lain pada permukaannya.

Pengujian kekerasan ini bertujuan :

1. Untuk memperoleh harga kekerasan suatu logam.
2. Untuk mengetahui perubahan suatu sifat dan perubahan suatu kekerasan dari logam setelah di *Heat Treatment*.
3. Untuk mengetahui kekerasan baja terhadap kecepatan pendinginan.
4. Untuk mengetahui perbedaan kekerasan yang disebabkan oleh media pendingin.

1. Pengujian Tarik (Tensile Test)

Tensile test adalah pengujian kekuatan suatu material dengan menarik suatu bahan sampai putus. Pada tensile test suatu material akan mengalami kerusakan, karena tensile test adalah pengujian kekuatan material dengan menarik suatu material sampai putus. Jadi material yang ditest kekuatannya akan rusak.

Pengujian ini merupakan proses pengujian yang biasa dilakukan karena pengujian tarik dapat menunjukkan perilaku bahan selama proses pembebanan. Pada uji tarik, benda uji diberi beban gaya tarik, yang bertambah secara kontinyu, bersamaan dengan itu dilakukan pengamatan terhadap perpanjangan yang dialami benda uji.

Uji tarik mungkin dapat dikatakan pengujian yang paling mendasar. Pengujian ini sangat sederhana, tidak mahal dan telah mengalami standarisasi di seluruh dunia, baik dari metode pengujian, bentuk spesimen yang diuji dan metode perhitungan dari hasil pengujian tersebut. Dengan menarik suatu material secara perlahan-lahan, kita akan mengetahui reaksi dari material tersebut terhadap pembebanan yang diberikan dan seberapa panjang material tersebut bertahan sampai akhirnya putus.

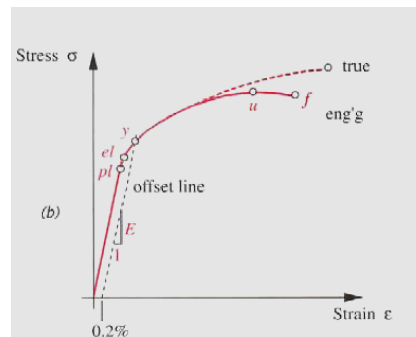


Gambar 4.1 Mesin uji tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan cara menarik batang uji perlahan-lahan sampai patah, sementara beban dan jarak panjang ukur dimonitor secara kontinyu.

Contoh hasil pengujian ini adalah kurva tegangan-regangan seperti yang dapat dilihat pada gambar 4.2 yaitu uji tarik yang ditampilkan dalam bentuk kurva “Tegangan-Regangan”.

Gambar 4.2 Kurva tegangan-regangan hasil uji tarik (Surdia & Saito, 1985)



Sifat-sifat material yang dapat ditentukan dari uji tarik adalah :

1. Modulus elastisitas

Titik *pl* pada gambar 4.2 menunjukkan batas “proporsional” dimana dibawah titik itu tegangan sebanding dengan regangan. Sifat proporsional ini dapat diformulasikan dengan hukum Hooke :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \tag{4.1}$$

E adalah kemiringan kurva tegangan-regangan sampai batas proporsional dan disebut sebagai Modulus Elastisitas material atau Modulus Young. *E* adalah merupakan ukuran kekakuan material pada batas elastisnya.

2. Batas elastis (*elastic limit*)

Titik e_l pada gambar 2.2a adalah batas elastis, atau titik dimana bila batas ini terlewati, material akan mengalami perubahan permanen atau deformasi plastis. Batas elastis ini juga merupakan tanda batas daerah perilaku elastik dengan daerah perilaku plastis.

3. Kekuatan luluh (*Yield Strength*)

Pada titik y , material mulai mengalami luluh dan laju deformasinya meningkat. Titik ini disebut titik luluh (*yield point*) dan nilai tegangan pada titik ini didefinisikan sebagai kekuatan luluh material. Untuk material yang tidak mempunyai titik luluh yang jelas, kekuatan tariknya harus didefinisikan dengan menggunakan garis *offset*. Garis *offset* ini digambar paralel dengan kurva elastis dan di-*offset* sejauh 0,2% dari regangan total pada sumbu regangan (disebut juga sigma 0,2)

4. Kekuatan tarik ultimat (*Ultimate Tensile Strength*)

Tegangan pada kurva tegangan-regangan akan terus meningkat sampai mencapai puncak atau nilai kekuatan tarik ultimat pada titik u . Pada gambar 2.1 terdapat dua kurva pada masing-masing gambar. Kedua kurva ini adalah kurva tegangan-regangan teknik (*engineering stress-strain curve*) dan kurva tegangan-regangan sebenarnya (*true stress-strain curve*). Pada kurva tegangan-regangan teknik, perhitungan tegangan dan regangan dilakukan dengan menggunakan luas penampang awal, A_0 , dan panjang ukur awal l_0 , sedangkan pada kurva tegangan-regangan sebenarnya perhitungan dilakukan dengan memperhitungkan perubahan luas penampang dan panjang sebenarnya.

2. Pengujian Tekan (Compressed Test)

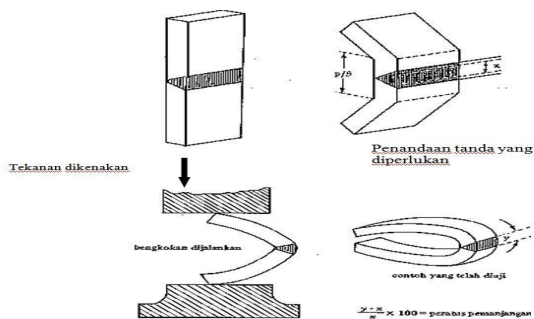


Gambar 4.3 Mesin uji tekan

Pada uji tekan umumnya kekuatan tekan lebih tinggi dari kekuatan tarik. Suatu material akan ditekan dan saat pengujian ini material akan rusak.

Prosesnya material akan ditaruh diatas landasan dan ditekan dari atas. Baru-baru ini telah ditemukan bahan yang baik terbuat dari keramik sebagai landasan dari silica, yang memberi pengaruh baik.

3. Pengujian Bengkok (Bending Test)



Gambar 4.4 Uji bending

Pengujian bengkok adalah salah satu cara pengujian yang dipakai sejak lama bagi bahan yang cocok, karena dapat dilakukan terhadap batang uji berbentuk sederhana dan tidak perlu menggunakan mesin uji biasa. Tapi pengujian ini menyebabkan material rusak karena akan terjadi patahan.

Pengujian ini merupakan salah satu pengujian sifat mekanik bahan yang diletakkan terhadap specimen dan bahan, baik bahan yang akan digunakan pada kontraksi atau komponen yang akan menerima pembebanan terhadap suatu bahan pada satu titik tengah dari bahan yang ditahan diatas dua tumpuan. Uji bengkok (bending test) merupakan salah satu bentuk pengujian untuk menentukan mutu suatu material secara visual. Selain itu uji bending digunakan untuk mengukur kekuatan material akibat pembebanan dan kekenyalan hasil sambungan las di weld metal. Dalam pemberian beban ada beberapa faktor yang harus diperhatikan, yaitu :

1. Kekuatan Tarik (Tensile Test)
2. Komposisi kimia dan struktur mikro terutama kandungan Mn dan C.
3. Tegangan luluh (yield).

4. Pengujian Puntir (Torsion Test)



Gambar 4.5 Uji bending

Pada pengujian puntiran suatu material akan rusak karena material tersebut akan mengalami patahan.

Umumnya ini terjadi pada material yang getas, sedangkan pada material yang ulet patahan terjadi pada sudut tegak lurus terhadap sumbu puntiran setelah gaya pada arah sumbu terjadi dengan deformasi yang besar.

5. Uji impact (Pukul Takik)

Uji impact dilakukan untuk menentukan kekuatan material sebagai sebuah metode uji impact digunakan dalam dunia industry khususnya uji impact charpy dan uji impact izod. Dasar pengujian ini adalah penyerapan energy potensial dari beban yang mengayun dari suatu ketinggian tertentu dan menumbuk material uji sehingga terjadi deformasi.

Sistem Pengujian Pukul Takik

1. Uji Charpy

Benda uji diletakkan secara mendatar dan ditahan pada sisi kiri & kanan. Kemudian benda dipukul pada bagian belakang takikan, letaknya persis di tengah. Takikan membelakangi pululan.

2. Uji Izod

Benda uji dijepit pada satu ujungnya pada posisi tegak. Lalu benda uji ini dipukul dari sisi depan pada sisi ujung yang lain.

Macam-Macam Patahan :

1. Patahan getas

Patahan yang terjadi pada bahan yang getas.

Contoh : besi tuang.

2. Patahan liat

Patahan yang terjadi pada bahan yang lunak.

Contoh : baja lunak, tembaga dan sebagainya

3. Patahan campuran

Patahan yang terjadi pada bahan yang cukup kuat, namun ulet.

6. Pengujian Kekerasan

Secara umum semua sifat mekanik dapat terwakili oleh sifat kekerasan bahan.

Orang berasumsi bahwa yang keras itu pasti kuat, sehingga “jika dibutuhkan bahan yang kuat, maka pilih bahan yang keras” ini merupakan pernyataan yang keliru, bahwa ada suatu bahan yang memiliki kesebandingan antara kekerasan dengan kekuatan itu benar tetapi ada juga sifat yang justru perbandingannya terbalik bahwa bahan yang keras akan rapuh. Oleh karena itu diperlukan definisi yang spesifik antara kekerasan dengan kekuatan kendati masing-masing memiliki korelasi.

Pengujian kekerasan ini bertujuan :

1. Untuk memperoleh harga kekerasan suatu logam.
2. Untuk mengetahui perubahan suatu sifat dan perubahan suatu kekerasan dari logam setelah di *Heat Treatment*.
3. Untuk mengetahui kekerasan baja terhadap kecepatan pendinginan.
4. Untuk mengetahui perbedaan kekerasan yang disebabkan oleh media pendingin.

Berdasarkan pada persyaratan tersebut maka ketiga metode tersebut pengujian kekerasan yang dibakukan pemakaiannya adalah :

1. Pengujian kekerasan dengan penekanan(indentation test)

Pengujian ini dilakukan merupakan pengujian kekerasan terhadap bahan logam dimana dalam menentukan kekerasannya dilakukan dengan cara menganalisis indentasi atau bekas penekanan pada benda uji sebagai reaksi dari pembebanan tekan

2. Pengujian kekerasan dengan goresan (scratch test)

Merupakan pengujian kekerasan terhadap benda (logam) dimana dalam menentukan kekerasannya dilakukan dengan mencari perbandingan dari bahan yang menjadi standart.

3. Pengujian kekerasan dengan cara dinamik (dynamic test)

Merupakan pengujian kekerasan dengan mengukur tinggi pantulan dari bola baja atau intan (*hammer*) yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu.

Pengujian yang paling banyak dipakai adalah penekanan-penekanan tertentu pada benda kerja dengan bahan tertentu dengan mengukur ukuran penekanan yang berbentuk diatasnya :

- a. Metode Rockwell
- b. Metode Brinell
- c. Metode Vickers

a) Uji Kekerasan Rockwell

Pengujian *Rockwell* merupakan suatu uji untuk mengetahui tingkat kekerasan. Tingkat kekerasan yang di uji adalah tingkat kekerasan logam baik logam *ferrous* maupun logam *non ferrous* dengan menggunakan alat *Rockwell Hardness Tester*.

Indentor = Intan / Bola Baja

b) Metode Pengujian Brinel

Pengujian dengan metode ini dilakukan dengan memberikan penekanan kepermukaan suatu specimen uji. Penekanan ini dilakukan dengan menggunakan suatu penekan (indentor) berbentuk bola.

Indentor = Bola Baja

c) Metode Pengujian Vickers

Kekerasan ini diukur dengan mempergunakan alat pengujian vickers. Dalam pengujian ini dipakai piramid dimana dengan sudut bidang duanya 136° sebagai penekan.

Hasil pengujian tidak tergantung pada besarnya beban / gaya tekan. Alat ini dapat mengukur kekerasan bahan mulai dari sangat lunak (5 VHN) sampai yang sangat keras (1500 VHN), tanpa perlu mengganti daya tekan dapat dipilih antara 1 – 120 Kg tergantung kekerasan atau ketebalan bahan yang diuji.

Indentor = Intan

Kekerasan vickers pada prinsipnya sama dengan kekerasan brinell, yaitu beban dibagi luas tapak penekanan.

Melalui pengujian ini diharapkan dapat mengetahui sifat – sifat logam seperti sifat mekanik, sifat fisik dan lain sebagainya. Sifat mekanik adalah kemampuan suatu bahan untuk menerima beban atau gaya tanpa menimbulkan kerusakan pada benda tersebut. Beberapa sifat mekanik antara lain :

1. *KEKUATAN (STRENGHT)*

Menyatakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa menyebabkan bahan menjadi patah, kekuatan ini terdiri dari : kekuatan tarik, kekuatan tekan, kekuatan geser, dan lain sebagainya.

2. *KEKERASAN (HARDNESS)*

Menyatakan kemampuan bahan untuk tahan terhadap goresan, pengikisan/abrasi. Sifat ini berkaitan terhadap sifat tahan aus (wear resistance).

3. *KEKENYALAN (ELASTICITY)*

Menyatakan kemampuan bahan untuk menerima tegangan tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk yang permanent setelah tegangan dihilangkan. Tetapi apabila tegangan melampaui batas maka perubahan bentuk akan terjadi walaupun beban dihilangkan.

4. *KEKAKUAN (STIFNESS)*

Adalah kemampuan bahan untuk menerima tegangan atau beban tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk atau defleksi.

5. *KEULETAN (PLASTICITY)*

Menyatakan kemampuan bahan untuk mengalami sejumlah deformasi plastis (yang permanent) tanpa mengakibatkan terjadinya kerusakan. Sifat ini sering disebut sebagai keuletan (ductility).

6. *KETANGGUHAN (TOUGHNESS)*

Menyatakan kemampuan bahan untuk menyerap sejumlah energi tanpa mengakibatkan terjadinya kerusakan atau banyaknya energi yang diperlukan untuk mematahkan suatu bahan.

7. *KELELAHAN (FATIQUE)*

Merupakan kecenderungan dari logam untuk patah bila menerima tegangan berulang – ulang yang besarnya masih jauh dibawah batas kekuatan elastisnya.

SOAL-SOAL

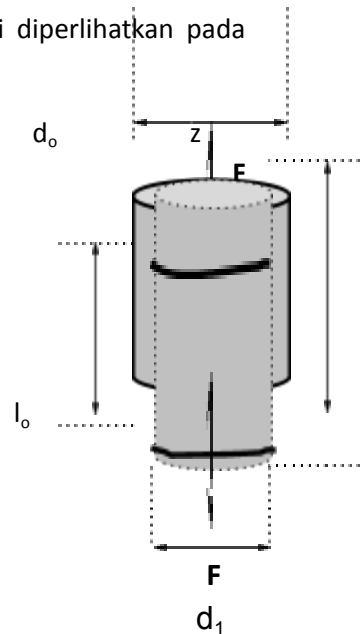
1. Sebuah silinder yang terbuat dari kuningan (*brass*) dengan diameter awal $d_0 = 0,4$ inci (10 mm), mengalami tegangan tarik (*tensile stress*) F sepanjang sumbu z , seperti diperlihatkan pada gambar di bawah ini:

Berapa besar gaya (beban) yang

dipakai bila terjadi perubahan diameter (Δd) x sebesar 10^{-4} inci ($2,5 \times 10^{-3}$ mm) dan deformasi yang terjadi seluruhnya pada daerah elastik.

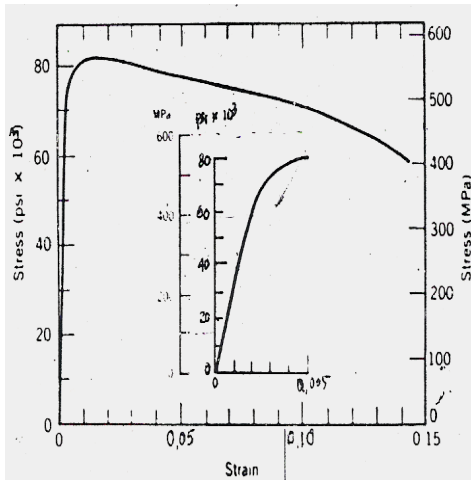
l_0 = panjang mula-mula

l_1 = panjang akhir



2. Di samping ini adalah gambar diagram *stress* dan *strain* untuk paduan baja (*steel alloy*)

- a. Berapa besar modulus elastisitasnya ?
- b. Berapa besar *yield strength*-nya pada *off set* 0,002.
- c. Dari gambar diketahui bahwa besar *tensile strength*-nya 81000 psi. Berapa beban maksimum yang dapat dicapai bila benda yang diuji tersebut berupa silinder dengan diameter awal 0,40inci.



BAB 5: PENGUJIAN TIDAK MERUSAK (*NON DESTRUCTIVE TEST*)

CAPAIAN PEMBELAJARAN

Diharapkan mahasiswa dapat mengenal, dan mengerti isi dari bab ini khususnya tentang pengujian yang tidak merusak seperti ultrasonik test, radiografi test dan lainnya.

5.1 *Non destrructive testing (NDT)*

Non destrructive testing (NDT) adalah aktivitas tes atau inspeksi terhadap suatu benda untuk mengetahui adanya cacat, retak, atau discontinuity lain tanpa merusak benda yang kita tes atau inspeksi. Pada dasarnya, tes ini dilakukan untuk menjamin bahwa material yang kita gunakan masih aman dan belum melewati damage tolerance. Material pesawat diusahakan semaksimal mungkin tidak mengalami kegagalan (failure) selama masa penggunaannya.

NDT dilakukan paling tidak sebanyak dua kali. Pertama, selama dan diakhir proses fabrikasi, untuk menentukan suatu komponen dapat diterima setelah melalui tahap-tahap fabrikasi. NDT ini dijadikan sebagai bagian dari kendali mutu komponen. Kedua, NDT dilakukan setelah komponen digunakan dalam jangka waktu tertentu. Tujuannya adalah menemukan kegagalan parsial sebelum melampaui damage tolerance-nya.

Metode utama Non Destructive Testing meliputi:

Visual Inspection

Sering kali metode ini merupakan langkah yang pertama kali diambil dalam NDT. Metode ini bertujuan menemukan cacat atau retak permukaan dan korosi. Dalam hal ini tentu saja adalah retak yang dapat terlihat oleh mata telanjang atau dengan bantuan lensa pembesar ataupun boroskop.



Visual inspection dengan boroskop

Liquid Penetrant Test

Metode Liquid Penetrant Test merupakan metode NDT yang paling sederhana. Metode ini digunakan untuk menemukan cacat di permukaan terbuka dari komponen solid, baik logam maupun non logam, seperti keramik dan plastik fiber. Melalui metode ini, cacat pada material akan terlihat lebih jelas. Caranya adalah dengan memberikan cairan berwarna terang pada permukaan yang diinspeksi. Cairan ini harus memiliki daya penetrasi yang baik dan viskousitas yang rendah agar dapat masuk pada cacat dipermukaan material. Selanjutnya,

penetrant yang tersisa di permukaan material disingkirkan. Cacat akan nampak jelas jika perbedaan warna penetrant dengan latar belakang cukup kontras. Sesuai inspeksi, penetrant yang tertinggal dibersihkan dengan penerapan developer.



Kelemahan dari metode ini antara lain adalah bahwa metode ini hanya bisa diterapkan pada permukaan terbuka. Metode ini tidak dapat diterapkan pada komponen dengan permukaan kasar, berpelapis, atau berpori.

Magnetic Particle Inspection

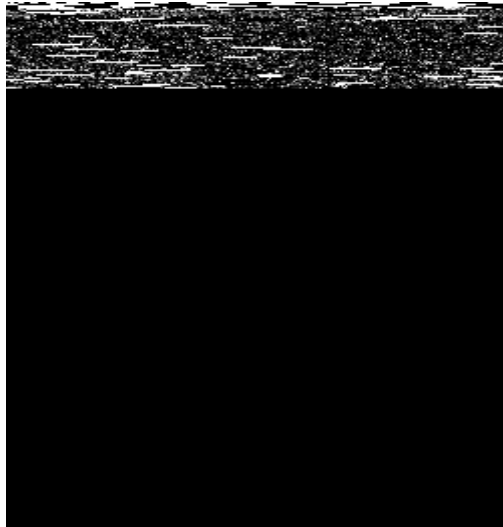
Dengan menggunakan metode ini, cacat permukaan (surface) dan bawah permukaan (subsurface) suatu komponen dari bahan ferromagnetik dapat diketahui. Prinsipnya adalah dengan memagnetisasi bahan yang akan diuji. Adanya cacat yang tegak lurus arah medan magnet akan menyebabkan kebocoran medan magnet. Kebocoran medan magnet ini mengindikasikan adanya cacat pada material. Cara yang digunakan untuk mendeteksi adanya kebocoran medan magnet adalah dengan menaburkan partikel magnetik dipermukaan. Partikel-partikel tersebut akan berkumpul pada daerah kebocoran medan magnet.



Kelemahannya, metode ini hanya bisa diterapkan untuk material ferromagnetik. Selain itu, medan magnet yang dibangkitkan harus tegak lurus atau memotong daerah retak serta diperlukan demagnetisasi di akhir inspeksi.

Eddy Current Test

Inspeksi ini memanfaatkan prinsip elektromagnet. Prinsipnya, arus listrik dialirkan pada kumparan untuk membangkitkan medan magnet didalamnya. Jika medan magnet ini dikenakan pada benda logam yang akan diinspeksi, maka akan terbangkit arus Eddy. Arus Eddy kemudian menginduksi adanya medan magnet. Medan magnet pada benda akan berinteraksi dengan medan magnet pada kumparan dan mengubah impedansi bila ada cacat.



Keterbatasan dari metode ini yaitu hanya dapat diterapkan pada permukaan yang dapat dijangkau. Selain itu metode ini juga hanya diterapkan pada bahan logam saja.

Ultrasonic Inspection

Prinsip yang digunakan adalah prinsip gelombang suara. Gelombang suara yang dirambatkan pada spesimen uji dan sinyal yang ditransmisi atau dipantulkan diamati dan diinterpretasikan. Gelombang ultrasonic yang digunakan memiliki frekuensi 0.5 – 20 MHz. Gelombang suara akan terpengaruh jika ada void, retak, atau delaminasi pada material. Gelombang ultrasonic ini dibangkitkan oleh transducer dari bahan piezoelektri yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi getaran mekanik kemudian menjadi energi listrik lagi.



Radiographic Inspection

Metode NDT ini dapat untuk menemukan cacat pada material dengan menggunakan sinar X dan sinar gamma. Prinsipnya, sinar X dipancarkan menembus material yang diperiksa. Saat menembus objek, sebagian sinar akan diserap sehingga intensitasnya berkurang. Intensitas akhir kemudian direkam pada film yang sensitif. Jika ada cacat pada material maka intensitas yang terekam pada film tentu akan bervariasi. Hasil rekaman pada film inilah yang akan memperlihatkan bagian material yang mengalami cacat.

Pengujian spesimen merupakan salah satu tahapan yang sangat penting untuk menjamin mutu dan kualitas suatu material, komponen atau bahan tertentu untuk memastikan layak untuk digunakan serta sesuai dengan standar yang sudah ditetapkan.

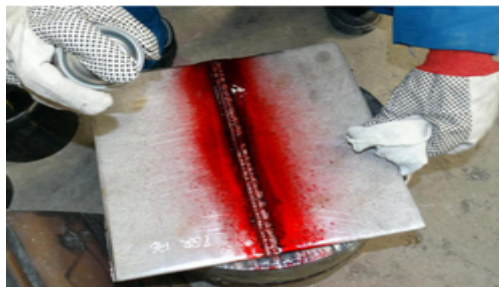
Terdapat dua jenis pengujian yaitu pengujian yang bersifat merusak struktur fisik bahan tersebut yaitu berupa uji tarik, uji impak, uji kekerasan dan lain sebagainya. Tujuan dilakukan pengujian merusak adalah untuk mengetahui sifat dari material atau bahan yang dilakukan pengujian. Akan tetapi dalam beberapa hal dan kebutuhan tertentu, dibutuhkan pengujian yang dilakukan tanpa merusak struktur fisik benda yang diuji untuk mengetahui adanya kerusakan atau cacat dalam suatu material yang lebih dikenal dengan istilah Non Destructive Testing (NDT). Berikut ini merupakan jenis-jenis pengujian yang tidak merusak.

1. Visual Inspection (Pengamatan)



Visual inspection merupakan salah satu pengujian yang sangat sederhana tanpa memerlukan peralatan yang khusus, biasanya hanya menggunakan kaca pembesar, senter dan alat pendukung lainnya. Untuk melakukan pengujian secara visual hanya perlu melakukan pengamatan pada spesimen bahan. Sangat efektif untuk mendeteksi cacat makroskopik atau cacat permukaan besar, misalnya cacat pada hasil pengelasan yang kurang baik.

2. Liquid(Dye) Penetrant Inspection



Liquid penetrant inspection adalah salah satu metode pengujian tidak merusak yang paling banyak digunakan untuk

berbagai kebutuhan, hal tersebut karena liquid penetrant inspection relatif mudah digunakan dan sangat fleksibel untuk berbagai macam penggunaan. Prinsip kerja metode ini didasarkan pada kemampuan cairan untuk masuk kedalam celah-celah permukaan yang mengalami cacat. Dengan metode ini cacat pada permukaan akan terlihat, caranya adalah dengan memberikan cairan berwarna terang pada permukaan material yang diinspeksi.

Cairan penetrant yang dianjurkan memiliki kemampuan penetrasi yang baik serta viskositas atau kekentalan yang cukup rendah, agar mampu mengalir masuk pada celah-celah permukaan apabila terdapat defect. Selanjutnya, penetrant yang tersisa dipermukaan benda dibersihkan dengan cairan pembersih. Cacat akan terlihat apabila ada cairan penetrant yang tertinggal didalam celah permukaan benda setelah developer disemprotkan. Walaupun metode ini sederhana akan tetapi perlu pemahaman serta pengamatan yang jeli pada permukaan benda uji tersebut agar cacat permukaan benda kerja dapat terlihat.

Keuntungan dari metode ini antara lain mudah diaplikasikan, murah, tidak dipengaruhi oleh sifat kemagnetan material dan komposisi kimianya serta jangkauan pemeriksaan yang cukup luas. Sedangkan kekurangan dari metode penetrant yaitu hanya bisa diaplikasikan pada permukaan yang terbuka dan tidak mampu diaplikasikan pada permukaan benda yang kasar dan berpori.

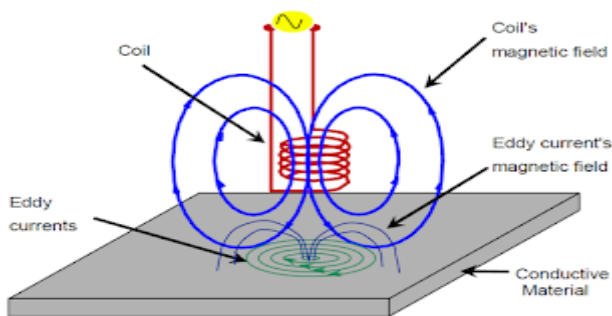
3. Magnetic Particle Inspection (MPI)



Magnetic particle inspection merupakan salah satu metode yang digunakan dalam pengujian tidak merusak (NDT), dengan metode ini cacat pada permukaan (surface) dan dibawah permukaan (subsurface) suatu benda dari bahan ferromagnetik dapat diketahui dan di inspeksi. Prinsip kerja dari metode magnetic particle inspection ini adalah dengan cara memagnetisasi bahan yang akan diuji. Apabila terdapat cacat atau defact yang tegak lurus terhadap arah medan magnet maka akan menyebabkan kebocoran pada arah medan magnet. Kebocoran medan magnet ini mengindikasikan adanya cacat pada material. metode yang dipakai untuk mengetahui adanya kebocoran pada medan magnet yaitu dengan menaburkan partikel atau serbuk magnetik pada permukaan benda uji. Partikel atau serbuk magnet yang sudah ditaburkan kemudian akan berkumpul tepat pada area yang terdapat kebocoran medan magnet.

5. *Eddy Current Testing*

6.



Eddy current test merupakan salah satu metode pengujian tidak merusak yang menerapkan prinsip elektromagnet untuk melakukan

pengujian atau inspeksi. yaitu terdapat sebuah kumparan yang dialiri arus listrik yang berfungsi untuk membangkitkan medan magnet didalamnya. Apabila medan magnet tersebut diaolikasikan pada benda logam yang akan dilakukan pengujian, maka akan membangkitkan arus eddy. Arus eddy tersebut kemudian akan menginduksikan adanya medan magnet yang terdapat pada kumparan dan mengubah impedansinya apabila terdapat cacat pada benda uji. Indikasi apabila terdapat cacat atau defect dapat dilihat saat menaburkan serbuk magnetik diatas permukaan material.

Metode eddy current pada prinsipnya hampir serupa dengan metode pengujian Magnetic particle inspection, akan tetapi medan listrik yang digunakan berupa arus listrik bolak-balik (AC), ketika terdapat cacat maka medan listrik akan berubah dan alat pengukur impedansi akan membaca atau mendeteksi apabila terdapat defect atau cacat.

5. Ultrasonic Inspection



Ultrasonic testing merupakan salah satu metode pengujian tidak merusak yang memanfaatkan gelombang atau getaran pada frekuensi yang tinggi. Ultrasonic Test dapat digunakan untuk menentukan kedalaman cacat atau defect secara spesifik yang meliputi besar dan letak cacat tersebut. Dalam pengujian Ultrasonic digunakan perlengkapan atau alat-alat yang lain yaitu probe sebagai penghasil getaran dengan frekuensi tinggi serta dibutuhkan couplant yaitu cairan pelapis pada permukaan benda uji.

Prinsip kerja pengujian Ultrasonic test yaitu dengan menembakkan getaran atau gelombang dengan frekuensi yang tinggi yaitu 0.25-10 Mhz. Gelombang tersebut akan merambat melalui benda uji kemudian gelombang tersebut akan dipantulkan kembali apabila gelombang tersebut mendeteksi cacat yang ada pada benda uji.

Apabila gelombang tersebut merambat pada bidang yang tegak lurus terhadap arah gelombang, maka gelombang tersebut akan dipantulkan kembali ke sumber gelombang kemudian akan ditampilkan pada layar monitor. Kedalaman cacat dapat diketahui dengan cara memperhitungkan selisih waktu yang dibutuhkan oleh rambatan gelombang hingga kembali menuju sumber gelombang tersebut.

6. Radiographic Testing



Radiographic testing adalah salah satu jenis pengujian tidak merusak dengan memanfaatkan radiasi sinar gama dan sinar X. Prinsip kerjanya yaitu, sinar X tersebut akan dipancarkan pada benda uji dan menembus permukaan material tersebut. Pada saat menembus bidang atau objek, sebagian sinar yang menembus akan diserap sehingga intensitas sinar akan berkurang. Intensitas akhir sinar kemudian direkam dan dicatat pada film yang sensitif. Jika ada defact atau cacat pada benda uji maka intensitas sinar yang tercatat pada film bervariasi. Hasil rekaman film ini yang akan menunjukkan letak dan bagian pada material yang mengalami defact atau cacat.

Untuk melakukan pengujian radiografi ini, harus memiliki kompetensi serta pengetahuan mengenai dampak yang akan ditimbulkan apabila salah satu bagian tubuh terpapar sinar x. Hal tersebut karena sinar x yang digunakan dalam metode pengujian radiografi ini tidak mampu diamati dengan kasat mata. Dalam melakukan pengujian radiografi tersebut, terdapat beberapa prosedur dan hal penting dalam melakukan pengujian radiografi yaitu, jangka waktu lamanya penyinaran berlangsung, jarak sumber radiasi atau penyinaran ke film (SFD) dan Penumbra (UG).

NDT / UJI TAK RUSAK

NDT adalah (Non Destructive Testing) aktivitas tes atau inspeksi terhadap suatu benda untuk mengetahui adanya cacat, retak, atau discontinuity lain tanpa merusak benda yang kita tes atau inspeksi. Pada dasarnya, tes ini dilakukan untuk menjamin bahwa material yang kita gunakan masih aman dan belum melewati damage tolerance. Material pesawat diusahakan semaksimal mungkin tidak mengalami kegagalan (failure) selama masa penggunaannya. NDT dilakukan paling tidak sebanyak dua kali.

Pertama, saat proses dan diakhir proses fabrikasi, untuk menentukan suatu komponen dapat diterima setelah melalui tahap-tahap fabrikasi. NDT ini dijadikan sebagai bagian dari kendali mutu komponen.

Kedua, NDT dilakukan setelah komponen digunakan dalam jangka waktu tertentu. Tujuannya adalah menemukan kegagalan parsial sebelum melampaui damage tolerance-nya.

Metode utama Non Destructive Testing meliputi:

Visual Inspection

Visual Inspection Sering kali cara ini merupakan langkah yang pertama kali diambil dalam hal NDT. Metode ini bertujuan menemukan cacat atau retak permukaan dan korosi. Dalam hal ini tentu saja adalah retak yang dapat terlihat oleh mata telanjang atau dengan bantuan lensa pembesar ataupun boroskop.

Visual inspection dengan boroskop merupakan pemeriksaan dengan menggunakan boroscope, dimana area pengujian yang akan di

uji berada di dalam rongga-rongga material ataupun mesin, dengan bantuan cable yang flexibel dan camera kecil dengan motor servo yang dapat di arahkan 360 derajat kiri kanan atas bawah, dan dengan tampilan video berwarna untuk tampilannya.

Liquid Penetrant Test

Metode Liquid Penetrant Test merupakan metode NDT yang paling sederhana. Metode ini digunakan untuk menemukan cacat di permukaan terbuka dari komponen solid, baik logam maupun non logam, seperti keramik dan plastik fiber. Melalui metode ini, cacat pada material akan terlihat lebih jelas. Caranya adalah dengan memberikan cairan berwarna terang pada permukaan yang diinspeksi. Cairan ini harus memiliki daya penetrasi yang baik dan viskousitas yang rendah agar dapat masuk pada cacat dipermukaan material. Selanjutnya, penetrant yang tersisa di permukaan material disingkirkan. Cacat akan nampak jelas jika perbedaan warna penetrant dengan latar belakang cukup kontras. Seusai inspeksi, penetrant yang tertinggal dibersihkan dengan penerapan developer. Untuk langkah langkahnya ada cek [di sini](#) langkah penggunaan penetrant.

Kelemahan dari metode ini antara lain adalah bahwa metode ini hanya bisa diterapkan pada permukaan terbuka. Metode ini tidak dapat diterapkan pada komponen dengan permukaan kasar, berpelapis, atau berpori.

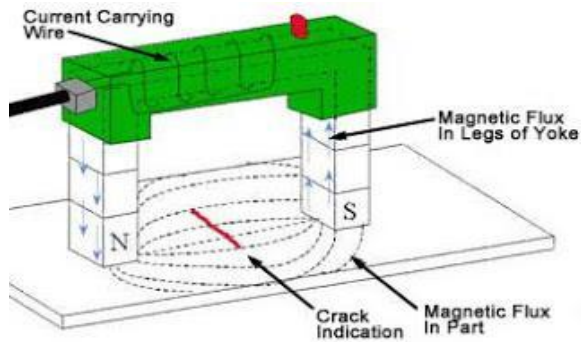


Magnetic Particle Inspection (MPI) / Magnetic Testing (MT)

Magnetic Testing (MT) adalah pengujian non-destruktif (NDT) untuk mendeteksi diskontinuitas yang ada di permukaan dan di bawah permukaan bahan feroelektrik seperti besi, nikel, kobalt, dan beberapa paduan mereka. Proses ini menempatkan sebuah medan magnetik ke bagian tersebut dan potongan tersebut dapat termagnetisasi dengan magnetisasi langsung atau tidak langsung. Magnetisasi secara langsung terjadi ketika arus listrik dilewatkan melalui benda uji dan medan magnet terbentuk dalam materi. Sedangkan Magnetisasi tidak langsung terjadi ketika tidak ada arus listrik dilewatkan melalui benda uji, tetapi medan magnet diterapkan dari sumber luar.

Dengan menggunakan metode ini, cacat permukaan (surface) dan bawah permukaan (subsurface) suatu komponen dari bahan ferromagnetik dapat diketahui. Prinsipnya adalah dengan memagnetisasi bahan yang akan diuji. Adanya cacat yang tegak lurus arah medan magnet akan menyebabkan kebocoran medan magnet. Kebocoran medan magnet ini mengindikasikan adanya cacat pada material. Cara yang digunakan untuk mendeteksi adanya kebocoran medan magnet adalah dengan menaburkan partikel magnetik

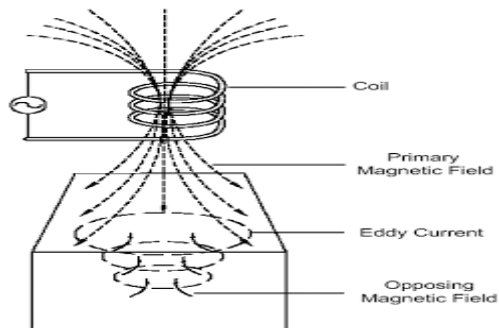
dipermukaan. Partikel-partikel tersebut akan berkumpul pada daerah kebocoran medan magnet.



Eddy Current Test

Tujuan utama dari metode pengujian baru adalah untuk mendeteksi dan menentukan kedalaman retak-seperti kerusakan di sudut ukur rel. Salah satu penyebab untuk ini adalah apa yang disebut pemuatan bahan material bahan bahan rel karena kecepatan tinggi dan beban gandar besar. Metode pengujian baru ini didasarkan pada prinsip arus eddy

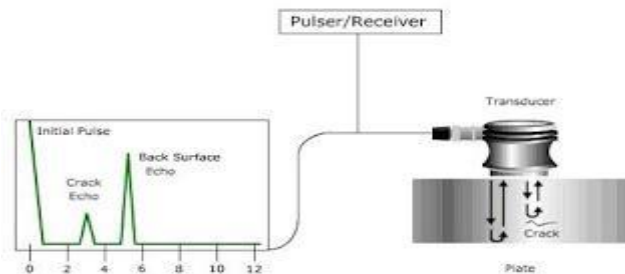
Inspeksi ini memanfaatkan prinsip elektromagnet. Prinsipnya, arus listrik dialirkan pada kumparan untuk membangkitkan medan magnet didalamnya. Jika medan magnet ini dikenakan pada benda logam yang akan diinspeksi, maka akan terbangkit arus Eddy. Arus Eddy kemudian menginduksi adanya medan magnet. Medan magnet pada benda akan berinteraksi dengan medan magnet pada kumparan dan mengubah impedansi bila ada cacat.



Keterbatasan dari metode ini yaitu hanya dapat diterapkan pada permukaan yang dapat dijangkau. Selain itu metode ini juga hanya diterapkan pada bahan logam saja.

Ultrasonic Inspection

Pengujian ultrasonik (UT) menggunakan energi suara berfrekuensi tinggi untuk melakukan pemeriksaan dan membuat pengukuran. Pemeriksaan ultrasonik dapat digunakan untuk deteksi cacat / evaluasi, pengukuran dimensi, dan banyak lagi. Prinsip pemeriksaan umum adalah pulsa/ echo metode konfigurasi inspeksi khas digambarkan sebagai berikut



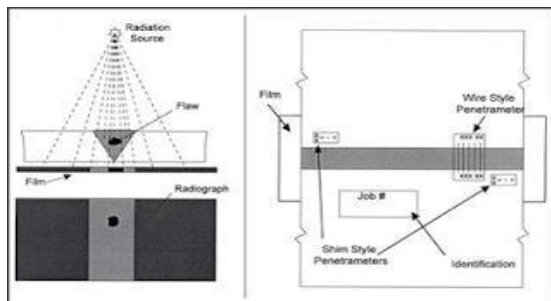
Keterangan :

- Initial Pulse = Pulsa inisial yang pertama
- Crack Echo = Echo cacat pada material (jarak posisi dari kecacatan yang ada pada bahan)
- Back Surface Echo = Echo pantulan balik dari bahan (Ketebalan bahan)

Prinsip yang digunakan adalah prinsip gelombang suara. Gelombang suara yang dirambatkan pada spesimen uji dan sinyal yang ditransmisi atau dipantulkan diamati dan interpretasikan. Gelombang ultrasonic yang digunakan memiliki frekuensi 0.5 – 20 MHz. Gelombang suara akan terpengaruh jika ada void, retak, atau delaminasi pada material. Gelombang ultrasonic ini dibnagkitkan oleh transducer dari bahan piezoelectric yang dapat menubah energi listrik menjadi energi getaran mekanik kemudian menjadi energi listrik lagi.

Radiographic Inspection

Pemeriksaan radiografi dan X-ray merupakan metode NDT yang mendeteksi cacat dalam bahanoleh penetrasi foton energi tinggi. Jumlah radiasi diserap kemudian dapat diukur untuk menentukan ketebalan atau komposisi bahan.



**Sebuah ilustrasi dari
proses pemeriksaan radiografi, menunjukkan inspeksi
dan pemeriksaan kualitas film fotografi**

Pengujian radiografi memiliki sensitivitas yang tinggi, untuk hampir semua pendeteksian kecacatan sebagian besar, tapi akibatnya adalah prosedur inspeksi yang lebih mahal daripada metode NDT alternatif. Ada juga bahaya radiasi ketika menggunakan metode ini, dan beberapa peralatan yang normal berorientasi kesumber radiasi menjalankan risiko tidak terdeteksi. Kebutuhan untuk radiografi atau x-ray pemeriksaan mencakup berbagai produk dari peralatan kamar gelap untuk penetrameters.

Metode NDT ini dapat untuk menemukan cacat pada material dengan menggunakan sinar X dan sinar gamma. Prinsipnya, sinar X dipancarkan menembus material yang diperiksa. Saat menembus objek, sebagian sinar akan diserap sehingga intensitasnya berkurang. Intensitas akhir kemudian direkam pada film yang sensitif. Jika ada cacat pada material maka intensitas yang terekam pada film tentu akan bervariasi. Hasil rekaman pada film inilah yang akan memperlihatkan bagian material yang mengalami cacat.

SOAL-SOAL

1. Sebutkan aplikasi dan metode NDT pada dunia industry.
2. Sebutkan Standar ISO dan Eropa untuk NDT.
3. Bagaimana langkah-langkah Inspeksi penetrasi.

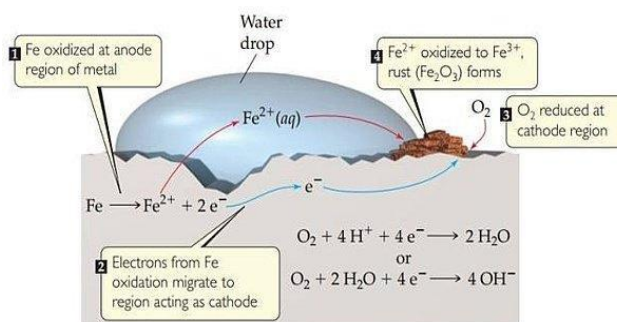
BAB 6: KOROSI

CAPAIAN PEMBELAJARAN

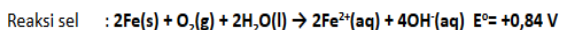
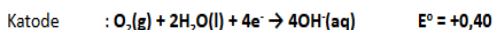
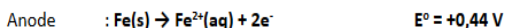
Diharapkan mahasiswa dapat memahami dan mengerti tentang proses Korosi baik jenis- jenis korosi mapuan cara pengujiannya.

6.1 Pengertian Korosi

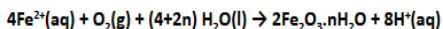
Secara umum korosi adalah rusaknya benda-benda logam yang disebabkan oleh pengaruh lingkungan. Proses korosi dapat dijelaskan secara elektrokimia. Misalnya pada proses perkaratan besi yang membentuk oksida besi. Secara elektrokimia, proses perkaratan besi adalah peristiwa teroksidasinya logam besi oleh oksigen yang berasal dari udara.



Korosi pada besi terjadi karena kontak dengan air. Pada besi tersebut ada yang menjadi anode dan ada yang menjadi katode. (Sumber: <http://schoolbag.info>).



Ion Fe^{2+} tersebut kemudian mengalami oksidasi lebih lanjut dengan reaksi:



Berdasarkan nilai potensial reaksinya, besi merupakan logam yang mudah mengalami korosi. Logam-logam lain yang mempunyai nilai potensial elektrode lebih besar dari 0,4 V akan sulit mengalami korosi, sebab dengan potensial tersebut akan menghasilkan Eoreaksi < 0 (negatif) ketika kontak dengan oksigen di udara. Logam-logam perak, platina, dan emas mempunyai potensial elektrode lebih besar dari 0,4 V sehingga sulit mengalami korosi.

Faktor penyebab korosi / yang mempercepat korosi:

1. Air dan kelembaban udara

Dilihat dari reaksi yang terjadi pada proses korosi, air merupakan salah satu faktor penting untuk berlangsungnya korosi. Udara lembab yang banyak mengandung uap air akan mempercepat berlangsungnya proses korosi.

2. Elektrolit

Elektrolit (asam atau garam) merupakan media yang baik untuk terjadinya transfer muatan. Hal ini mengakibatkan elektron lebih mudah untuk diikat oleh oksigen di udara. Air hujan banyak mengandung asam, sedangkan air laut banyak mengandung garam. Oleh karena itu air hujan dan air laut merupakan penyebab korosi yang utama.

3. Permukaan logam yang tidak rata

Permukaan logam yang tidak rata memudahkan terjadinya kutub-kutub muatan, yang akhirnya akan berperan sebagai anode dan katode. Permukaan logam yang licin dan bersih akan menyebabkan korosi sulit terjadi, sebab kutub-kutub yang akan bertindak sebagai anode dan katode sulit terbentuk.

4. Terbentuknya sel elektrokimia

Jika dua logam yang berbeda potensial bersinggungan pada lingkungan berair atau lembab, dapat terbentuk sel elektrokimia secara langsung. Logam yang potensialnya lebih rendah akan segera melepaskan elektron ketika bersentuhan dengan logam yang potensialnya lebih

tinggi, serta akan mengalami oksidasi oleh oksigen dari udara. Hal tersebut mengakibatkan korosi lebih cepat terjadi pada logam yang potensialnya rendah, sedangkan logam yang potensialnya tinggi justru lebih awet. Sebagai contoh, paku keling yang terbuat dari tembaga untuk menyambung besi akan menyebabkan besi di sekitar paku keling tersebut berkarat lebih cepat.

Korosi dapat dihambat *kok*. Tentunya dengan beberapa cara. Perhatikan ya cara mencegah korosi di bawah ini!



Mengecat mencegah logam berkarat (Sumber: desainrumah.com)

1. Mengontrol atmosfer agar tidak lembab dan banyak oksigen, misalnya dengan membuat lingkungan udara bebas dari oksigen dengan mengalirkan gas CO₂.
2. Mencegah logam bersinggungan dengan oksigen di udara dan juga air. Pencegahan ini dilakukan dengan cara sebagai berikut:
 - a. Mengecatnya
Lapisan cat mencegah kontak langsung besi dengan oksigen dan air. Hanya jika cat tergores atau terkelupas, maka korosi mulai terjadi dan dapat menyebar di bawah cat yang masih utuh. Contoh yang menggunakan teknik ini adalah pada kapal, jembatan dan mobil.
 - b. Memberi oli atau minyak
Lapisan oli bisa mencegah kontak langsung besi dengan oksigen dan air dan harus dioleskan secara berkala. Contoh yang menggunakan teknik ini adalah pada bagian bergerak dari mesin, seperti mesin mobil.

c. Memberi lapisan plastik

Lapisan plastik mencegah kontak langsung besi dengan oksigen dan air. Hanya jika plastik terkelupas, korosi mulai terjadi. Contoh yang menggunakan teknik ini adalah pada barang-barang dapur, seperti rak pengering.

d. Galvanisasi

Galvanisasi yaitu melapisi logam dengan seng (contohnya atap seng). Lapisan seng (Zn) dapat mencegah kontak langsung logam dengan oksigen dan air. Disamping itu, Zn yang teroksidasi, menjadi $Zn(OH)_2$ dapat bereaksi lebih lanjut dengan CO_2 di udara membentuk lapisan oksida $Zn(OH)_2 \cdot xZnCO_3$ yang sangat kuat. Apabila lapisan Zn tergores, Zn masih dapat melindungi besi karena Zn ($E_o = -0,76 V$) lebih mudah teroksidasi dibanding Fe ($E_o = -0,44 V$). Contoh cara mencegah korosi dengan teknik ini adalah pada besi penopang untuk konstruksi bangunan dan jembatan.

e. Elektroplating

Elektroplating adalah pelapisan logam dengan logam lain menggunakan metode elektrolisis. Sebagai contoh, pelapisan dengan logam nikel (veernikel), krom (contohnya: kran air), timah (misalnya kaleng makanan), dan timbal (contohnya pipa air minum).

f. Pelapisan krom/Cr

Lapisan Cr mencegah kontak langsung logam dengan oksigen dan air. Di samping itu, Cr teroksidasi membentuk lapisan oksida Cr_2O_3 yang sangat kuat sehingga dapat melindungi logam Fe di bawahnya. Apabila tergores, lapisan Cr masih dapat melindungi besi karena Cr ($E_o = -0,74V$) lebih mudah teroksidasi dibanding Fe ($E_o = -0,44 V$).

g. Pelapisan timah/Sn

Lapisan Sn dapat mencegah kontak langsung logam dengan oksigen dan air. Akan tetapi, Sn ($E_o = -0,14 V$) kurang reaktif dibanding Fe ($E_o = -0,44$

V). Jadi, apabila lapisan Sn tergores, maka besi di bawahnya mulai korosi.

h. Sherardizing

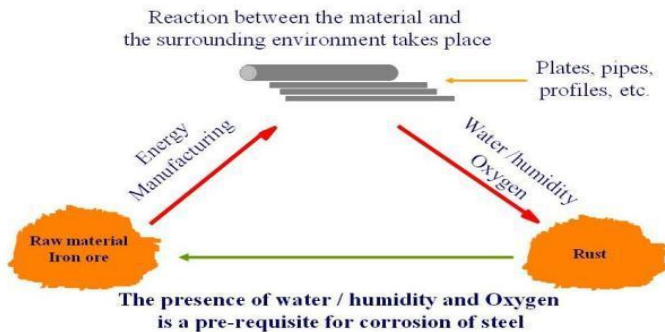
Sherardizing adalah mereaksikan logam dengan asam fosfat sehingga permukaan logam tertutup dengan fosfat ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$). Sebagai contoh, badan mobil.

3. Perlindungan Katodik

Perlindungan katodik dilakukan dengan cara menghubungkan logam yang akan dilindungi dengan logam lain yang mempunyai potensial elektrode yang sangat rendah (biasanya Mg). Ketika terjadi oksidasi, logam yang dilindungi akan segera menarik elektron dari logam pelindung sehingga oksidasi akan berlangsung pada logam pelindung tersebut. Oleh karena logam pelindung teroksidasi, maka lama-kelamaan dapat habis dan harus selalu diganti dengan yang baru secara periodik.

Korosi adalah fenomena kerusakan material, biasanya logam karena pengaruh lingkungannya. Faktor lingkungan penyebab korosi ini dijelaskan sebagai reaksi kimia atau elektro kimia yang dihasilkan dari suhu, cuaca/ iklim, kelembaban, atau zat-zat tertentu yang ada di lingkungan tersebut. Jadi korosi adalah proses yang alamiah, tidak bisa dihilangkan tapi bisa kita cegah dan kontrol sehingga tidak merugikan asset dan keselamatan kita. Analogi proses ilmiah korosi ini mungkin bisa disamakan dengan meleburnya logam tersebut kembali ke alam, kembali ke bentuk asalnya (bijih besi dan lainnya). Korosi biasanya dapat dengan mudah kita buktikan, saat kita meletakkan logam besi di udara terbuka, tanpa perlindungan korosi, maka tanda-tanda karat akan kita temui dalam beberapa hari. Dari sinilah timbul konsep awal, bahwa sifat ilmiah logam besi itu sendiri adalah tidak stabil, sehingga mudah bereaksi ketika bersentuhan dengan embun atau air (elektrolit) atau bahkan bahan-bahan kimia lain.

Beginilah kira-kira siklus produksi dan degradasi logam besi (sumber: Jotun Paint School)



Korosi akan dan hanya akan terjadi bila di metal terjadi sebuah siklus tertutup yang dinamakan "corrosion cell". Corrosion cell adalah sirkuit elektrikal imajiner media berpindahannya electrons dan ions dari dua logam dengan muatan yang berbeda. Di dalam corrosion cell selalu terdapat empat faktor sebagai berikut:

1. **Anoda :**

adalah bagian logam yang bermuatan positif atau memiliki nilai potensial yang lebih lemah (istilahnya less noble metal). Dan bila korosi terjadi pada dua metal yang berlainan, anoda adalah jenis metal yang memiliki energi potensial lebih kecil terhadap metal lainnya. Di anoda adalah bagian metal yang akan terkorosi (kehilangan bagiannya, misalnya larut di elektrolit dsb.)

2. **Katoda :**

adalah bagian logam yang bermuatan negatif atau memiliki nilai potensial yang lebih tinggi (istilahnya more noble metal). Dan bila korosi terjadi pada dua metal yang berlainan, katoda adalah jenis metal yang memiliki energi potensial lebih tinggi terhadap metal

lainnya. Di katoda adalah bagian metal yang mungkin terjadi deposit saat terjadi korosi, sangat jarang kehilangan bagiannya.

3. **Methalic pathway :**

adalah konduktor yang menghubungkan anoda dan katoda. Ia dapat berupa kontak logam-ke-logam, atau factor eksternal seperti kabel, baut (system bolting), deck support, system suspensi, atau sejenisnya) atau bila korosi terjadi dalam satu jenis logam saja, maka metallic pathway-nya adalah logam itu sendiri... yang terpenting disini methalic pathway merupakan jembatan mengalirnya elektron (arus listrik) diantara anoda dan katoda.

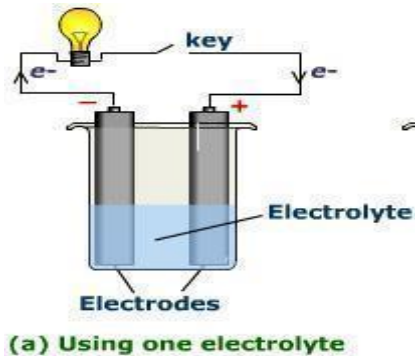
4. **Elektrolit :**

adalah liquid, atau medium yang menghantarkan listrik (mengandung ions). Ini membuktikan bahwa di dalam banyak kasus korosi dengan mudah terjadi dilingkungan yang lembab atau mengandung banyak air. Air yang mengandung ions dan menghantarkan listrik. Semakin besar kandungan ion di dalam suatu elektrolit, akan semakin baik daya hantar listriknya, maka akan semakin cepat pula rate korosi yang akan dihasilkan. Hanya sedikit kasus korosi yang terjadi di kondisi special yang kering seperti di permesinan atau system gas buang (exhaust system). Bila suatu logam besi dicelupkan kedalam air laut, maka air laut itu sendiri merupakan elektrolit dan air laut merupakan elektrolit yang sangat baik. Selain air laut, embun atau air yang mudah menyerap partikel-partikel ions atau garam dari permukaan logam atau atmosfer sekitar juga akan membentuk elektrolit yang efektif.

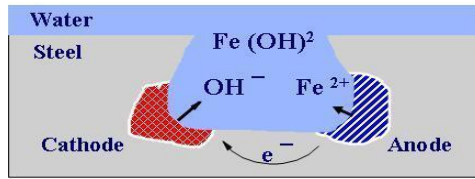
5. **Oksigen**

Sebenarnya keempat faktor diatas sudah cukup untuk menghasilkan korosi, tetapi kecepatan korosi yang dihasilkan lambat. Di dalam banyak hal oksigen adalah penyebab percepatan korosi. Jadi ada literatur yang

menjelaskannya sebagai faktor kelima (dalam tanda kutip). Oksigen dalam proses korosi dapat diperoleh udara sekitar, larut didalam air, atau bagian dari atmosfer. Keberadaan oksigen akan mempercepat laju korosi terjadi sebab oksigen akan bereaksi dengan logam saat logam melepaskan energi elektrikalnya. Analogi yang termudah dari sebuah corrosion cell adalah sama dengan kinerja sebuah baterai, dimana dengan menghubungkan dua logam berbeda (memiliki potensial listrik yang berbeda pula), kita dapat menimbulkan voltase. Dua logam tersebut, salah satunya berperan sebagai anoda (carbon rod), dan yang lainnya sebagai katoda (Zinc). Kira-kira gambarannya seperti berikut (sumber: Google) :



Tetapi ini tidak hanya terbatas sampai di dua logam tidak sejenis saja. Ketika satu logam sejenis berada dilingkungan tertentu (korosif), maka bagian logam tersebut juga akan ada yang berperan sebagai anoda (bermuatan positif) dan ada yang berperan sebagai katoda (bermuatan negatif). Kira-kira secara mikroskopis skemanya akan seperti ini (sumber : Jotun Paint School) :



Cathode:



Anode:



Water, Iron ions and Hydroxyl ions combine to give rust : $\text{Fe}(\text{OH})_2, \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$

Penjelasan proses elektro kimia dari korosi (disatu logam sejenis) diatas sebagai berikut:

1. Secara alamiah sifat besi menghantarkan arus listrik, menyediakan metallic pathway, dan menghasilkan area-area yang anodic (anoda) dan cathodic (katoda), karena adanya perbedaan potensial listrik yang tidak uniform di besi tersebut.
2. Ketika besi terendam atau bersentuhan dengan elektrolit seperti air laut atau embun, di area anode, Molekul Besi (Fe) akan mulai bereaksi dengan melepaskan elektronnya sehingga terbentuk ion Fe^{++} .
3. Di katoda, saat elektron lepas didalam elektrolit, kemudian terurai menjadi ion positif dan negatif, membentuk $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{OH}^-$.
4. Secara simultan elektron bereaksi dengan hidrogen ion untuk membentuk atom-atom hidrogen, kemudian secara diatomik membentuk gas hidrogen H_2 .
5. Karena sebuah siklus maka ion Hydroxyl OH^- kembali ke anode melalui elektrolit membawa elektron-elektron.
6. Ion besi bermuatan positif Fe^{++} kemudian kembalinya ion hydroxyl ini untuk bergabung bersama membentuk oxide besi (iron hydroxide – Hydrus iron oxide) yang secara umum disebut juga rust atau karat.

Formula sederhananya adalah $\text{Fe}^{++} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$. Sehingga dengan ini cukup jelas bahwa korosi selalu terjadi di bagian anoda dan bukan di katoda.

Ilustrasi diatas menunjukkan bahwa material akan larut saat terjadi korosi. Bagian-bagian besar dari material yang terkorosi akan tetap berada di permukaan logam, walaupun dalam banyak kasus mungkin juga material terkorosi hilang seiring aliran elektrolit. Jadi secara umum kita bisa melihat proses korosi dari timbulnya produk-produk korosi dipermukaan logam. Produk korosi ini disebut juga karat! Karat adalah produk yang kita temukan saat besi atau steel mengalami proses korosi. Umumnya karat besi yang berwarna merah kecoklatan menunjukkan keberadaan dari oxide besi Fe_2O_3 .

Mean Corrosion rate, e.g. low-alloyed steel and zinc (microns/year)

Atmosphere	Zinc Coating	Low-alloyed steel
Rural	1 – 2 pm	10 – 60 pm
Town	3– 5pm	30 – 70 pm
Industrial	6 – 10 pm	40 – 160 pm
Marine (coastal)	5 – 9 pm	60 – 230 pm

Gambar Mean Corrosion Rate of Metal

Dari gambar diatas dapat kita lihat perbedaan laju korosi dari baja dan seng pada lingkungan yang berbeda-beda. Lingkungan operasi di laut memberikan pengaruh yang terburuk dibandingkan dengan lingkungan industri dan lainnya. Seberapa cepatkah suatu logam terkorosi? Pertanyaan mudah, namun secara sederhana sulit dicari jawabannya. Jika arus korosi yang sebenarnya dapat diukur secara akurat secara real time, kita bisa memiliki gambaran yang baik tentang

hal ini. Dari banyak literatur prediksi laju korosi material dapat dicari dengan menggunakan rumus Faraday untuk menentukan corrosion allowance (batas korosi yang diijinkan) terhadap suatu struktur sehingga dapat ditentukan jadwal pemeliharannya. Korosi dapat diukur dalam bentuk kedalaman serangan (depth of attack) apalagi bila korosinya bersifat serangan lokal (pitting atau celah) yang diukur dalam satuan mm, atau secara umum dapat dinilai dari adanya kehilangan berat dari material yang terkorosi tersebut, diukur dalam (g/cm^2) atau sebagai rate (mm / tahun).

Untuk memprediksi laju korosi material adalah sangat sulit. Alasannya adalah bahwa jumlah parameter dan variabel yang mempengaruhi korosi sangat besar. Selain itu, laju korosi dapat meningkat atau berkurang, tergantung pada produk korosi yang terbentuk di dalam sistem dan bagaimana kondisi lingkungan yang mempengaruhi korosi berubah terhadap waktu. Perlu dicatat bahwa variabel korosif dapat sangat berbeda dari satu jenis elektrolit dengan elektrolit lainnya. Misalnya tingkat korosifitas air laut bervariasi tergantung daerah dan iklimnya. Faktor-faktor penting seperti salinitas, temperatur (yang mempengaruhi kelarutan oksigen) dan aktivitas mikrobiologi/ pertumbuhan akan bervariasi baik dengan lokasi geografis dan musim.

Pada banyak kasus, secara umum kecepatan korosi pada logam akan bergantung pada:

- Type dari material
- Type dari elektrolit/ lingkungan sekitar
- Kondisi operasi
- Keberadaan kontaminan di lingkungan sekitar
- Type dari pelindung korosi yang dipakai pada suatu sistem atau material.

Spesifik dari sudut kondisi lingkungan, korosifitas akan meningkat atau bervariasi tergantung pada:

- Suhu
- Salinitas
- Kandungan oksigen

- Kecepatan Air
- Keasaman
- Jenis elektrolit (misalnya kargo atau bahan kimia)
- Isi kontaminan/ polusi yang mempromosikan korosi
- Mikro-organisme, dll

Salinitas air laut adalah salah satu faktor yang paling menentukan korosifitas suatu lingkungan. Garam membuat air menjadi konduktor listrik dan mempromosikan proses elektrokimia korosi. **Keasaman/ pH:** Skala pH (0-14) digunakan sebagai ukuran keasaman. Skala ini didasarkan pada konsentrasi ion hidrogen dalam suatu larutan. Nilai 1 (asam) mengacu pada keasaman tertinggi, sedangkan 14 adalah (basa) adalah nilai yang paling rendah, sedangkan 7 adalah netral. Secara umum korosi akan meningkat seiring dengan meningkatnya keasaman (nilai pH rendah), tetapi tingkat alkalinitas (basa) yang tinggi juga dapat mempromosikan korosi. Misalnya terjadi pada Aluminium dimana hanya pasif pada kondisi yang mendekati solusi netral (pH 5-8). Sifat korosif lingkungan laut biasanya meningkat seiring dengan meningkatnya:

- Kelembaban
 - Suhu
 - Kandungan garam
 - Kandungan polusi udara, termasuk jelaga dan partikel debu
- Akhirnya, kondisi eksposur adalah sangat penting terhadap kecepatan korosi. Pengaruh korosi yang cepat biasanya terjadi karena:
- Kondisi yang menyulitkan permukaan logam yang basah menjadi kering (ventilasi yang buruk, garam kondisi yang lembab, dll)
 - Peningkatan konduktivitas lapisan film pada permukaan logam yang lemah (karena garam dan kontaminan asam-acid)
 - Tekanan lingkungan yang buruk, seperti tekanan dan suhu yang tinggi.
 - Perubahan kondisi lingkungan yang terjadi dengan cepat (misalnya perubahan suhu tinggi ke suhu rendah dengan tiba-tiba dapat

memberikan tegangan termal terhadap bahan dasar, sistem pelindung, dan terjadi kondensasi di permukaan logam)

- Tekanan mekanis dapat menghancurkan sistem pelindung atau menghapus film atau lapisan pelindung yang terbentuk pada permukaan logam.
- Rusaknya lapisan pelindung oksida/ film oksida pada permukaan logam (misalnya pada stainless steel dan aluminium dan penghapusan tembaga oksida (copper oxide)/ hidroksida pada tingkat aliran yang tinggi.
- Galvanic kopling (sentuhan) dengan bahan yang lebih mulia/ noble (Bi-metallic corrosion).
- Rasio yang sangat besar antara daerah Katoda dan daerah Anoda yang dapat menyebabkan korosi terkonsentrasi di daerah anoda.

Lebih sederhana lagi pada material baja, kecepatan korosi biasanya meningkat seiring dengan

- Meningkatnya temperatur, dan
- Meningkatnya kelembaban.

Pengujian Korosi

Pengujian korosi dilakukan dengan mengetahui berapa besar korosi (*Corrosion Penetration Rate/CPR*). Metode yang digunakan dalam pengukuran laju korosi adalah menggunakan **Metode Kehilangan Berat**. Metode ini digunakan sebagai ukuran ketahanan korosi, dapat dinyatakan dengan *mil per year* (mpy). Bila diketahui kehilangan berat selama proses pengujian material berat jenis material uji (*W*) dan waktu pengujian (*T*), maka laju penembusan korosi (*CPR*) dapat dihitung dari persamaan di bawah ini (Kenneth.R, et.al,1991):

$$CPR = \frac{KW}{ADT}$$

(6.1)

Keterangan:

CPR = laju (penembusan) korosi (*Corrosion Penetration Rate*)
atau berkurangnya ketebalan material tiap satuan
waktu satuan: *mil per year* (mpy) atau *millimeter per*
year (mm/yr)
(1 mil = 10^{-3} inchi)

W = kehilangan berat selama pengujian (mg)

K = konstanta yang besarnya bergantung pada satuan yang
dipakai

Memakai: $K = 534$ jika menggunakan satuan mpy

(dengan satuan $A =$ luas permukaan = inchi²)

$K = 87,6$ jika menggunakan mm/yr (dengan
satuan $A =$ cm²)

$D = \rho =$ berat jenis (gr/cm³)

$T =$ waktu (jam)

Bila nilai CPR kurang dari 20 mpy atau 0,5 mm/yr, maka nilai tersebut
masih dapat diterima.

Uji korosi yang dilakukan dengan menggunakan korosi basah
dan korosi kering. Penjelasannya sebagai berikut:

A. Uji Korosi Basah:

Pengaruh Waktu

Sebelum diuji korosi, bahan komposit ditimbang massanya (m_0).
Setelah itu di uji kerosinya dengan direndam masing-masing di dalam
larutan asam HCl, larutan basa NaOH dan larutan garam NaCl, dengan
konsentrasi masing-masing 0,1 Molar, dalam waktu perendaman
selama 6 jam dengan interval waktu tiap 2 jam. Setelah 2 jam, sampel
diangkat dan dibersihkan dengan cara merendamnya ke dalam
campuran larutan HCl (1000 ml), 50 gram SnCl₂ dan 20 gram Sb₂O₃

selama 15 menit. Setelah itu sampel di cuci kembali dengan menggunakan alkohol 70 % dan dikeringkan, kemudian ditimbang beratnya (m) untuk memperoleh produk korosi/kehilangan berat selama pengujian dinyatakan dengan $W = m_0 - m$.

Pengaruh pH Larutan

Sampel direndam selama 2 jam dalam larutan dengan pH =1, 3, 5, 7, 9, 11, 13. Untuk pH 1, 3, 5 dibuat dari larutan HCl pekat yang diencerkan masing-masing menjadi 0,1 M, 0,001 M dan 0,00001 M. Sedangkan pH = 7 dibuat dengan cara menimbang 5,85 gram NaCl, kemudian dilarutkan hingga volume mencapai 1000ml. Kemudian untuk pH = 9, 11 dan 13 dengan cara menimbang 40 gram NaOH kemudian dilarutkan dalam 1000 ml aquades, masing-masing diencerkan 10 kali, 100 kali dan 1000 kali. Setelah 2 jam, sampel diangkat dan dibersihkan dengan perlakuan seperti pada uji korosi basah pengaruh waktu.

B. Uji Korosi Kering

Dengan Temperatur 100°C.

Sampel dimasukkan ke dalam *furnace* / tungku selama (gambar 5.13) selama 96 jam dengan interval waktu tiap 24 jam. Pengangkatan dan pembersihan sampel, perlakuannya seperti pada uji korosi basah pengaruh waktu.

Dengan Temperatur Ruang ~ 27°C

Sampel diletakkan di udara terbuka (temperatur ruang) selama 96 jam dengan interval waktu tiap 24 jam. Pengangkatan dan pembersihan sampel, perlakuannya seperti pada uji korosi basah pengaruh waktu.

SOAL-SOAL

1. Spesimen baja karbon rendah dengan ukuran $0,2 \times 0,1 \times 0,03$ m dipaparkan pada lingkungan industri kimia. Dalam waktu 1 minggu, setelah dilakukan produk korosinya dihilangkan, ternyata berat spesimen berkurang sebanyak 0,0006 kg. Hitunglah laju korosi dari spesimen tersebut ?
2. Sebutkan faktor-faktor yang berasal dari lingkungan yang dapat mempengaruhi korosi

3. Dengan apakah perlindungan korosi yang paling sempurna dilakukan untuk melindungi logam di penggalan mesin yang berputar ?

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. William D.Callister, 1985, Jr, *Materials Science and Engineering*, John Wiley Sons.
- [2]. Tata Surdia,Shinroku, 1985, *Pengetahuan Bahan Teknik*, Penerbit PT PradnyaParamita.
- [3]. Ronald F Gibson,1994, *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw-Hill Inc.

- [4]. Robert M.Jones, 1975, *Mechanics of Composite Materials*, McGraw-Hill Inc.
- [5]. Lawrence H Van Vlack, 1985, *Elements of Materials Science and Engineering*, Addison-Wesley, Publishing Company, USA.
- [6]. Wahid Suherman, 1987, *Pengetahuan Bahan*, Jurusan T. Mesin ITS.
- [7]. RE Smallman,RJ Bishop,1999, *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering*, Reed Educational and Professional Publishing Ltd.New York.

Wikipedia. Mei Tahun 2009

http://en.wikipedia.org/wiki/Destructive_testing

Afnany Information

[http://faisolafnan.blogspot.com/2013/04/laporan-uji-kekerasan-bab-i-
pendahuluan.html](http://faisolafnan.blogspot.com/2013/04/laporan-uji-kekerasan-bab-i-pendahuluan.html)

Macam-Macam Pengujian Bahan

<http://sekolah007.blogspot.com/2013/04/macam-macam-pengujian-bahan.html>

Mechanical Engginering Kalimantan

[http://himawantriraharjo.blogspot.com/2013/03/pengujian-dengan-m
erusak-dan-tidak.html](http://himawantriraharjo.blogspot.com/2013/03/pengujian-dengan-merusak-dan-tidak.html)

BIODATA PENULIS



Dr. Prantasi Harmi Tjahjanti, S.Si., MT.

Penulis lahir di kota yang terkenal brem dan sambal pecel, Madiun, 15 November 1968. Setelah lulus S1 dari Fisika MIPA Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya (ITS), sempat bekerja di Perusahaan Swasta di Surabaya, sebagai *Technical Service* merangkap *Marketing*. Selanjutnya tahun 1994 menjadi dosen pegawai negeri di Universitas Jember (Unej). Dilanjutkan studi S2 mengambil *Materials Science and Engineering* di Universitas Indonesia (UI) Jakarta. Tahun 2003 pindah dari Unej sebagai Dosen LLDIKTI (Kopertis Wilayah VII Jawa Timur) dpk Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. Program S3 ditempuh di Fakultas Teknologi Kelautan bidang produksi dan material kapal di ITS Surabaya. Bidang ahli penulis adalah material khususnya material komposit. Penulis juga merupakan *reviewer* internal Kemenristekdikti untuk program penelitian serta Tim Pengendali Mutu untuk Badan Penelitian dan Pengembangan Pemerintah Provinsi Jawa Timur.