

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

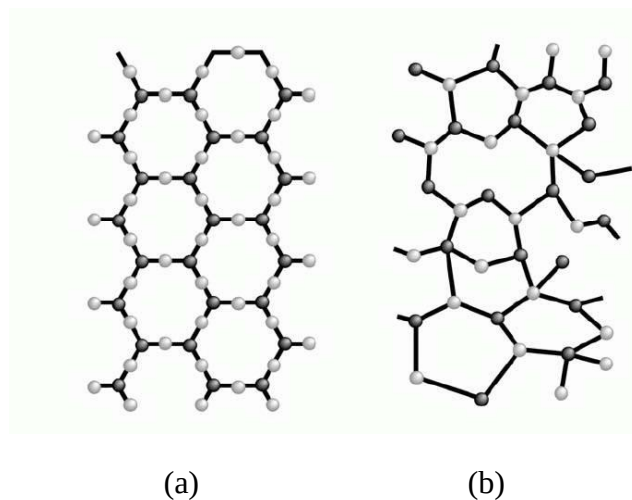
A. Kristal

Kristal didefinisikan sebagai komposisi atom-atom zat padat yang memiliki susunan teratur dan periodik dalam pola tiga dimensi. Keteraturan susunan tersebut terjadi karena kondisi geometris yang harus memenuhi adanya ikatan atom yang berarah dan susunan yang rapat. Atom-atom bergabung membentuk padatan (*solid*), atom-atom itu mengatur dirinya sendiri dalam pola tatanan tertentu yang disebut kristal (Malvino, 1981: 16). Susunan khas atom-atom dalam kristal disebut struktur kristal.

Struktur kristal terbentuk dari gabungan sel satuan yang merupakan sekumpulan atom yang tersusun secara khusus dan periodik berulang dalam tiga dimensi pada suatu kisi kristal. Kumpulan atom penyusun kristal sering juga disebut dengan basis dan kedudukan atom-atom di dalam ruang dinyatakan oleh kisi. Ditinjau dari strukturnya, zat padat dibagi menjadi tiga yaitu *monocrystal* (kristal tunggal), *polycrystal*, dan *amorf*.

Pada kristal tunggal (*monocrystal*), atom atau penyusunnya mempunyai struktur tetap karena atom-atom penyusunnya tersusun secara teratur dalam pola tiga dimensi dan pola-pola ini berulang secara periodik dalam rentang yang panjang tak berhingga. *Polycrystal* adalah kumpulan dari kristal-kristal tunggal yang memiliki ukuran sangat kecil dan saling menumpuk yang membentuk benda padat.

Amorf memiliki pola susunan atom-atom atau molekul-molekul yang acak dan tidak teratur secara berulang. *Amorf* terbentuk karena proses pendinginan yang terlalu cepat sehingga atom-atom tidak dapat dengan tepat menempati lokasi kisinya. Untuk mengetahui susunan atom kristal dan *amorf* ditunjukkan pada Gambar 1.



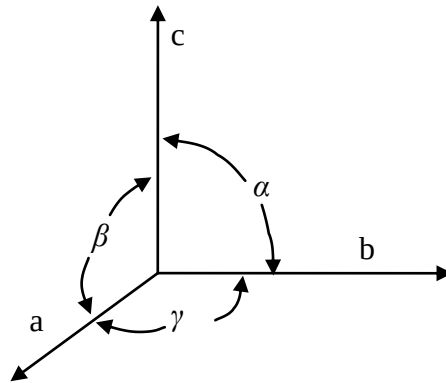
Gambar 1. (a). Susunan atom kristal, (b). Susunan atom *amorf*.
(Smallman dan Bishop, 2000: 13).

1. Struktur Kristal

Susunan khas atom-atom dalam kristal disebut struktur kristal. Struktur kristal dibangun oleh sel satuan (*unit cell*). Sel satuan adalah bagian terkecil dari unit struktur yang dapat menjelaskan struktur suatu kristal. Tiga sisi suatu sel satuan disebut sudut-sudut permukaan batas (antar permukaan) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2. Pengulangan dari sel satuan akan mewakili struktur secara keseluruhan.

Geometri kristal dalam ruang tiga dimensi 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 pertualangan yang menjadi ciri khas dari suatu kristal.



Gambar 2. Sumbu-sumbu dan sudut-sudut antar sumbu kristal.
(Nyoman Suwitra, 1989: 13)

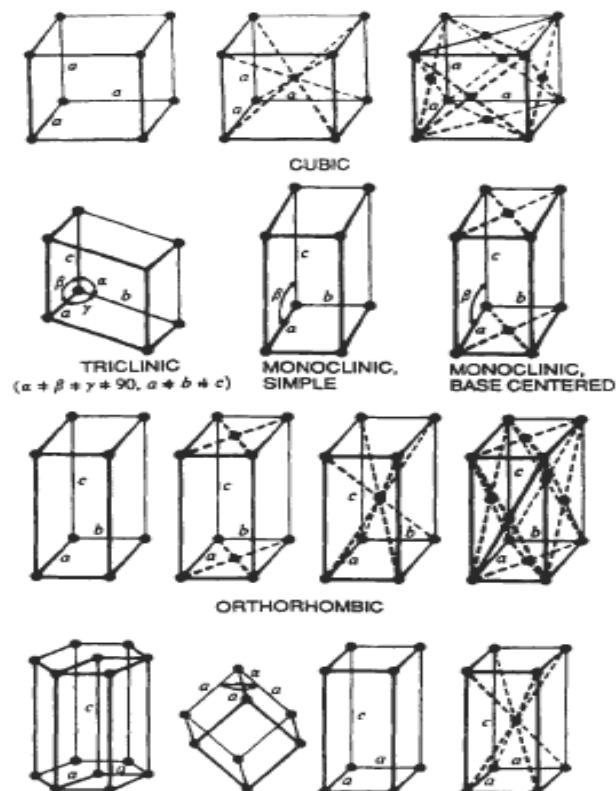
Sumbu-sumbu a , b , dan c adalah sumbu-sumbu yang dikaitkan dengan parameter kisi kristal. Sedangkan α , β , dan γ merupakan sudut antar sumbu-sumbu referensi kristal. Berdasarkan sumbu-sumbu a , b , dan c (kisi bidang) dan sudut α , β , dan γ (kisi ruang), kristal dikelompokkan menjadi 7 sistem kristal (hubungan sudut satu dengan sudut yang lain) dengan 14 kisi bravais (perbandingan antara sumbu-sumbu kristal). Seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Tujuh sistem kristal dan empat belas kisi Bravais (Kittel, 1976 : 15)

Sistem Kristal	Parameter Kisi	Kisi Bravais	Simbol
Kubik	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Sederhana Pusat Badan Pusat Muka	P I F
Monoklinik	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	Sederhana Pusat Dasar	P C
Triklinik	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Sederhana	P

Tetragonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Sederhana Pusat Badan	P I
Orthorombik	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Sederhana Pusat dasar Pusat Badan Pusat Muka	P C I F
Trigonal / Rhombohedral	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ > 120^\circ$	Sederhana	P
Heksagonal / Rombus	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Sederhana	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 dipusat setiap bidang kisi diberi tanda F (*face*); sel dengan simpul kisi dipusat bagian dalam sel unit ditandai dengan huruf I (*inti*); huruf R menunjukkan pada sel primitif rhombohedral.



Gambar 3. Empat belas kekisi Bravais (Milthon Ohring, 1992: 3).

2. Parameter Kisi *hexagonal*

Arah berkas yang dipantulkan semata-mata ditentukan oleh geometri kisi, yang bergantung pada orientasi dan jarak bidang kristal. Apabila kristal memiliki simetri *hexagonal* ($a = b = 90^\circ$, $c = 120^\circ$) dengan ukuran parameter kisi a , maka sudut difraksi berkas dari bidang kristal (hkl) dapat dihitung dengan mudah dari hubungan jarak antar interplanar. Di dalam parameter kisi dikenal Persamaan Bragg, yaitu:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

struktur kristal $\text{Cd}(\text{Se}_{0,2}\text{Te}_{0,8})$ memiliki struktur kristal *hexagonal*.

Dengan demikian Jarak interplanar untuk struktur kristal *hexagonal* adalah

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + k + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (2)$$

substitusi $d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$ ke Persamaan (2) ditulislah

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + k + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (3)$$

atau

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{3a^2} (h^2 + k + k^2) + \frac{\lambda^2}{4c^2} l^2 \quad (4)$$

Untuk menghitung nilai a , dicari nilai indeks Miller (hkl) yang harga $l = 0$

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{3a^2} (h^2 + k + k^2) \quad (5)$$

$$A = \frac{\lambda^2}{3a^2} \quad (6)$$

$$a = \frac{\lambda}{\sqrt{3A}} \quad (7)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (6) ke dalam Persamaan (5), didapatkan:

$$\sin^2 \theta = A(h^2 + hk + k^2) \quad (8)$$

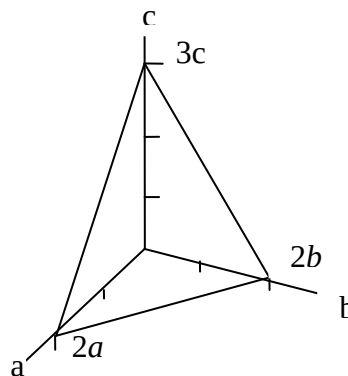
$$A = \frac{\sin^2 \theta}{(h^2 + hk + k^2)} \quad (9)$$

3. Indek Miller

Suatu kristal mempunyai bidang-bidang atom yang mempengaruhi sifat dan perilaku bahan. Kelompok bidang tergantung pada sistem kristal. Dua bidang atau lebih dapat tergolong dalam kelompok bidang yang sama. Indeks Miller adalah harga kebalikan dari parameter numerik yang dinyatakan dengan simbol (hkl) . Pada Gambar 4, perpotongan bidang dengan sumbu dinyatakan dengan $2a$, $2b$, dan $3c$ sehingga parameter numeriknya adalah 2, 2, 3 dan indeks Miller dari bidang bawah adalah:

$$(hkl) = h : k : l = \frac{1}{2} : \frac{1}{2} : \frac{1}{3}.$$

$$(hkl) = (1/2 \ 1/2 \ 1/3) \text{ atau } (3 \ 3 \ 2)$$



Gambar 4. Perpotongan bidang dan sumbu (Nyoman Suwitra, 1989: 48)

4. Faktor Struktur Kristal

Faktor struktur (F) adalah pengaruh struktur kristal pada intensitas berkas yang didifraksikan (Cullity, 1956: 117-123). Besarnya faktor struktur (F) adalah:

$$F_{hkl} = \sum_n^N f_n e^{2\pi i(hx_n + ky_n + lz_n)} \quad (10)$$

dengan f_n adalah faktor hamburan atom (x_n, y_n, z_n) adalah koordinat suatu atom, dan (h,k,l) adalah nilai indeks Miller. Faktor struktur

- a) Dari Persamaan (10), diperoleh kasus sederhana bahwa sel satuan hanya berisi satu atom saja dan mempunyai fraksi koordinat 0 0 0, sehingga faktor strukturnya:

$$F = f e^{2\pi i(0)} = f \quad (11)$$

dan

$$F^2 = f^2$$

- b) Pusat dasar sel mempunyai dua atom pada beberapa macam per unit sel kubik yang berlokasi pada 0 0 0 dan $\frac{1}{2} \frac{1}{2} 0$.

$$\begin{aligned} F &= f e^{2\pi i(0)} + f e^{2\pi i(\frac{h}{2} + \frac{k}{2})} \\ &= f(1 + e^{\pi i(h+k)}) \end{aligned} \quad (12)$$

Pernyataan ini dapat dievaluasi tanpa perkalian dengan *konjugate* kompleks, ($h+k$) selalu bulat dan F adalah real, tidak kompleks. Jika h dan k semuanya genap atau ganjil, jumlah ini selalu genap dan $e^{\pi i(h+k)}$ mempunyai nilai 1. Jika h dan k adalah satu genap dan satu ganjil maka jumlah ($h+k$) disini adalah ganjil dan $e^{\pi i(h+k)}$ mempunyai nilai -1.

$$F = \begin{cases} 2f & ; h \text{ dan } k, \text{ semua genap atau ganjil.} \\ F^2 = 4f^2 \\ 0 & ; h \text{ dan } k, \text{ genap dan ganjil (campur).} \\ F^2 = 0 \end{cases}$$

Dalam tiap kasus, harga pada indek tidak mempunyai pengaruh pada faktor struktur. Contoh refleksi (111), (112), (113), dan (021), (022), (023) semua mempunyai nilai yang sama pada F , yaitu $2f$. Dengan cara yang sama, refleksi (111), (112), (113), dan (101), (102), (103) semua mempunyai faktor struktur 0.

- c) Faktor struktur pada sel kubik pusat badan (*bcc*) mempunyai dua atom yang berjenis sama, berlokasi pada 0 0 0 dan $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$.

$$\begin{aligned} F &= f e^{2\pi i(0)} + f e^{2\pi i(h/2+k/2+l/2)} \\ &= f [1 + e^{\pi i(h+k+l)}] \end{aligned} \quad (13)$$

$$F = \begin{cases} 2f ; & \text{jika } (h+k+l) \text{ adalah genap.} \\ F^2 = 4f^2 \\ 0 ; & \text{jika } (h+k+l) \text{ adalah ganjil.} \\ F^2 = 0 \end{cases}$$

Kesimpulan dari perbandingan geometrikan, bahwa pusat dasar sel akan memproduksi refleksi 0 0 1. Hal ini sebagai akibat adanya faktor struktur untuk dua sel.

- d) Permukaan pusat sel kubik pusat muka (fcc), diasumsikan untuk mengisi 4 atom pada lokasi $0\ 0\ 0$, $\frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ 0$, $\frac{1}{2}\ 0\ \frac{1}{2}$, dan $0\ \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}$.

$$F = f e^{2\pi i(0)} + f e^{2\pi i(h/2+k/2)} + f e^{2\pi i(h/2+l/2)} + f e^{2\pi i(k/2+l/2)}$$

$$= f [1 + e^{\pi i(h+k)} + e^{\pi i(h+l)} + e^{\pi i(k+l)}] \quad (14)$$

Jika h , k , dan l tidak bercampur, lalu ketiga penjumlahan $(h+k)$, $(h+l)$, dan $(k+l)$ adalah bilangan bulat, setiap keadaan dalam persamaan diatas bernilai 1. Jika h , k , dan l bercampur kemudian dijumlahkan dengan tiga eksponensial hasilnya -1. Tetapi dua indek adalah ganjil dan 1 genap atau 2 genap dan 1 ganjil. Sebagai contoh h dan l genap dan k adalah ganjil $0\ 1\ 2$. Kemudian $F = f(1-1+1-1) = 0$, tidak terjadi refleksi.

$$F = \begin{cases} 4f & ; \text{ untuk indek yang tidak bercampur.} \\ F^2 = 16f^2 \\ \\ 0 & ; \text{ untuk indek bercampur.} \\ F^2 = 0 \end{cases}$$

Refleksi akan terjadi untuk bidang seperti $(1\ 1\ 1)$, $(2\ 0\ 0)$, dan $(2\ 2\ 0)$ tetapi tidak untuk bidang $(1\ 0\ 0)$, $(2\ 1\ 0)$, $(1\ 1\ 2)$, dan sebagainya.

Basis *bcc* mengacu pada sel kubik yang memiliki atom-atom identik pada $x_1 = y_1 = z_1 = 0$ dan pada $x_2 = y_2 = z_2 = \frac{1}{2}$, maka faktor struktur pada kisi ini adalah:

$$F_{hkl} = f e^{2\pi i(0)} + f e^{2\pi i(h/2+k/2+l/2)}$$

$$= f [1 + e^{\pi i(h+k+l)}] \quad (15)$$

$$F_{hkl} = \begin{cases} 2f; & \text{jika } h+k+l = \text{genap.} \\ 0; & \text{jika } h+k+l = \text{ganjil.} \end{cases}$$

Jika beda fase gelombang terpantul oleh bidang adalah π , maka amplitudo terpantul dari dua bidang terpasang adalah: $A + Ae^{(-i\pi)} = A - A = 0$. Posisi atom pada kristal dengan struktur kisi pusat badan (I) adalah (x_j, y_j, z_j) dan $(\frac{1}{2} + x, \frac{1}{2} + y, \frac{1}{2} + z)$. Faktor struktur dinyatakan oleh persamaan:

$$\begin{aligned} F_{hkl} &= \sum_{j=1}^{N/2} f_j \{ \exp 2\pi i (hx_j + ky_j + lz_j) + \exp 2\pi i (hx_j + ky_j + lz_j) \cdot \exp \pi i (h + k + l) \} \\ &= \sum f_j \exp 2\pi i (hx_j + ky_j + lz_j) [1 + \exp(\pi i \{h + k + l\})] \end{aligned} \quad (16)$$

$$F_{hkl} = \begin{cases} 2 \{ \sum f_j \exp 2\pi i (hx_j + ky_j + lz_j) \} & ; \text{jika } h + k + l = \text{genap.} \\ 0 & \end{cases}$$

e) *Hexagonal close-packed (hcp)* mempunyai dua atom yang berlokasi pada 000 dan $\frac{2}{3} \frac{1}{3} \frac{1}{2}$.

$$\begin{aligned} F &= f e^{2\pi i (0)} + f e^{2\pi i (\frac{2h}{3} + \frac{k}{3} + \frac{l}{2})} \\ &= f \left[1 + e^{\pi i (\frac{4h}{3} + \frac{2k}{3} + l)} \right] \end{aligned}$$

$$F = \begin{cases} 2f; & h \text{ dan } k \text{ sama, } l \text{ genap.} \\ F^2 = 4f^2 \\ 0; & h \text{ dan } k \text{ sama, } l \text{ ganjil.} \\ F^2 = 0 \end{cases}$$

Faktor struktur menentukan intensitas yang muncul pada difraktogram, dimana faktor struktur berperan penting dalam menentukan bentuk karakteristik dari kisi kristal. Nilai faktor struktur bergantung pada arah difraksi.

- a. Faktor struktur pada kristal kubik sederhana.

$$F_{hkl} = \sum_{j=1}^N f_j \exp 2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j) \quad (17)$$

Intensitas selalu muncul pada sembarang nilai hkl .

- b. Faktor struktur pada kristal kubik pusat badan.

$$F_{hkl} = \sum_{j=1}^N f_j \{\exp[-\pi i(h + k + l)] + 1\} \quad (18)$$

Intensitas muncul jika nilai $h+k+l$ bilangan ganjil, dan intensitas tidak muncul ketika nilai $h+k+l$ bilangan genap.

- c. Faktor struktur pada kristal kubik pusat muka.

$$F_{hkl} = \sum_{j=1}^N f_j \{1 + \exp(-\pi i(h + l)) + \exp(-\pi i(h + k)) + \exp(-\pi i(k + l))\} \quad (19)$$

Intensitas muncul jika $h+k+l$ semua gasal atau semua genap, dan intensitas tidak muncul ketika $h+k+l$ campuran antara gasal dan genap.

- d. Faktor struktur pada kristal heksagonal.

$$F_{hkl} = f\{1 + \exp[-i\pi(h + k + 2l)]\} \quad (20)$$

Intensitas hanya muncul ketika nilai $h+k+l$ bilangan genap.

5. Ketidaksempurnaan pada kristal

Berdasarkan struktur kristal, atom dalam setiap material tersusun secara teratur, tetapi terdapat berbagai ketidaksempurnaan atau sering disebut dengan cacat kristal. Cacat kristal ini terjadi pada suatu bahan padat yang dapat mempengaruhi sifat fisis tertentu seperti mekanik atau sifat listrik. Cacat yang terdapat pada kristal memiliki bermacam-macam bentuk di antaranya:

a) Cacat titik

Cacat titik terjadi karena adanya penyimpangan susunan periodik kisi terbatas sekitar beberapa atom sehingga terjadi kekosongan atom (*vacancy*), sisipan (*interstisi*), dan perpindahan kedudukan atom tak murni disela kisi (*anti site*). Penyimpangan susunan periodik kisi disekitar atom merupakan cacat dalam konsentrasi yang besar dalam kesetimbangan termodinamika seiring meningkatnya temperatur secara eksponensial. Kekosongan adalah kehilangan sebuah atom dalam kristal yang disebabkan penumpukan yang salah ketika pada proses kristalisasi, yaitu pada saat temperatur tinggi. Pada keadaan suhu tinggi, energi thermal akan meningkat letak kisinya ke lokasi atomik terdekat. Sisipan terjadi jika terdapat atom tambahan dalam struktur kristal, sedangkan untuk *anti site* terjadi jika pemindahan ion dari kisi ke tempat sisipan.

b) Cacat garis

Cacat garis (*planar*), muncul karena adanya diskontinuitas struktural sepanjang lintasan kristal (*dislokasi*), atau cacat akibat salah susun struktur kristal. 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.

c) Cacat planar

Dalam cacat *planar* terdapat batas butir, yaitu batas sudut kecil secara memadai dapat digambarkan sebagai dinding vertikal terdiri dari dislokasi. Rotasi suatu kristal relatif terhadap kristal lainnya seperti batas puntir, dihasilkan oleh jaringan silang yang terdiri dari dua sel dislokasi ulir. Batas puntir ini adalah batas sederhana yang memisahkan dua kristal yang memiliki perbaedaan orientasi kecil, sedangkan batas butir memisahkan kristal yang mempunyai perbedaan sudut orientasi besar

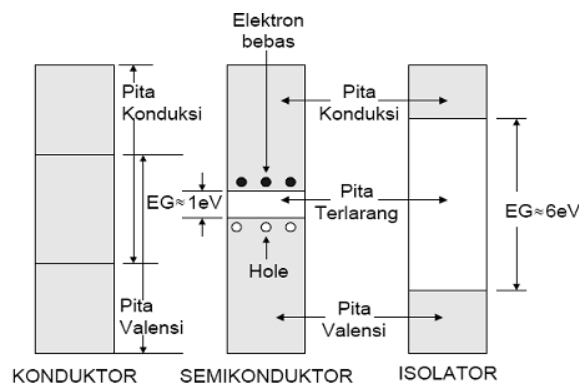
d) Cacat volume

Cacat volume terjadi akibat pemanasan, *iradiasi*, deformasi sehingga terbentuk *void*, gelembung gas dan rongga dalam kristal dimana sebagian berasal dari energi permukaan ($1 \text{ sampai } 3 \text{ J/m}^3$). Aliran plastis deformasi yang terjadi secara berkesinambungan mengakibatkan jumlah dislokasi menjadi sangat besar dan saling berkaitan sehingga menghambat gerak masing-masing dan mengakibatkan plastis bahan semakin bertambah. Gejala ini disebut *pengerasan*, untuk mengembalikan

kelentukan bahan yang mengalami pengerasan dilakukan pemanasan kristal atau *annealing*. Kristal yang mengalami pengerasan mengandung 10^{16} m dislokasi per meter kubik volumenya, hal ini dapat direduksi dengan *annealing* menjadi sekitar 10^6 m (Arthur Beiser, 1992: 361)

A. Bahan Semikonduktor

Berdasarkan struktur pita energi, suatu bahan dibedakan menjadi tiga macam, yakni konduktor, isolator, dan semikonduktor. Konduktor memiliki pita valensi dan pita konduksi saling bertumpangan. Semikonduktor dan isolator, pita valensi dan pita konduksi tidak bertumpangan, dan selang di antaranya menyatakan energi yang tidak boleh dimiliki elektron. Selang seperti itu disebut pita terlarang (*band gap*) yang menunjukkan besarnya energi gap yang dimiliki bahan tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Struktur pita energi dari konduktor, semikonduktor dan isolator

Konduktor adalah penghantar listrik yang baik atau memiliki resistansi listrik yang kecil. Hal ini disebabkan karena konduktor memiliki energi gap yang sangat kecil bahkan dapat dipandang seperti tumpang tindih (*overlap*) antara pita valensi dan pita konduksi. Konduktor memiliki struktur pita energi yang diisi

elektron hanya sebagian saja. Pita energi yang terisi elektron 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 seperti elektron bebas yang lincah dan gerakannya menghasilkan arus listrik. Pita energi yang terisi sebagian merupakan pita konduksi. Jika suhunya diperbesar hambatan listriknya bertambah pula. Hal ini disebabkan karena elektron-elektron yang bebas mendapatkan energi termal sehingga tidak lagi mudah untuk digerakkan. Contoh dari bahan konduktor adalah tembaga, aluminium, besi, dan sebagainya.

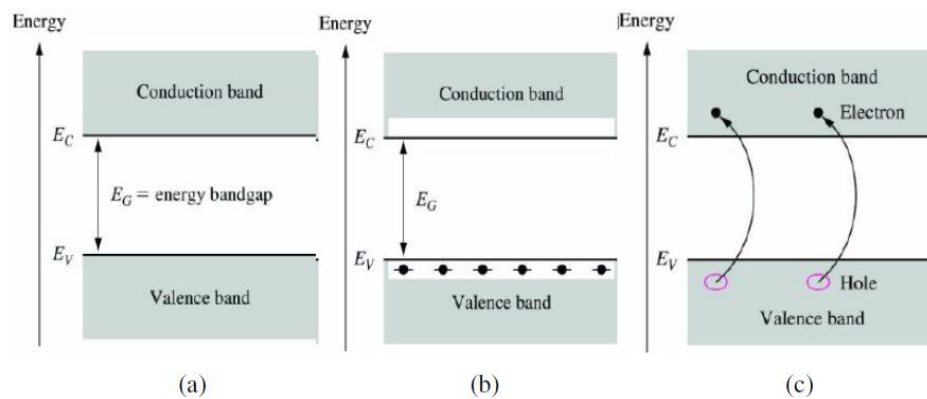
Isolator adalah bahan yang tidak dapat menghantarkan arus listrik atau suatu penghantar yang buruk. Isolator memiliki pita valensi yang penuh berisi elektron, sedangkan pita konduksinya kosong. Energi gap isolator sangat besar sekitar 6 eV, sehingga energi yang diperoleh dari medan eksternal terlalu kecil untuk memindahkan elektron melewati energi gap tersebut, sehingga penghantaran listrik tidak dapat berlangsung. Umumnya isolator memiliki dua sifat yaitu :

1. Mempunyai celah energi yang cukup besar antara pita valensi dan pita konduksi.
2. Tingkat energi fermi terletak pada celah energinya (Nyoman Suwitra, 1989: 186).

Semikonduktor merupakan bahan yang memiliki konduktivitas listriknya terletak antara konduktor dan isolator, atau bahan yang memiliki resistivitas antara konduktor dan isolator yaitu sebesar $10^{-2} - 10^{-9} \Omega\text{m}$. Bahan semikonduktor seperti

germanium, silikon, karbon, dan selenium. Semikonduktor memiliki struktur pita energi yang sama dengan isolator, celah energi terlarang atau *energi gap* (E_g) pada semikonduktor jauh lebih kecil daripada isolator. Celah energi yang tidak terlalu besar ini menyebabkan semikonduktor memiliki perilaku yang berbeda dari bahan isolator.

Berdasarkan dengan 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 eV 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 pembawa muatan negatif dan *hole* merupakan pembawa muatan positif. Jadi, hantaran listrik pada semikonduktor sangat bergantung pada suhu dibandingkan dengan hantaran listrik pada konduktor dan isolator (Nyoman Suwitra, 1989:187).



Gambar 6. Struktur pita energi pada semikonduktor (Reka Rio,1982: 18).

Berdasarkan Gambar 6(b) setiap atom penyusun kristal semikonduktor memiliki sejumlah elektron valensi pada kulit terluarnya yang menempati keadaan valensi, keadaan elektron valensi ini memiliki tingkat energi besarnya E_v . Elektron valensi ini berkontribusi pada pembentukan ikatan kovalen antara atom-atom penyusun kristal semikonduktor. Gambar 6(a) adalah keadaan elektron yang sudah terbebas dari ikatan kovalen disebut dengan 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 6(c) diilustrasikan keadaan konduksi elektron konduksi 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 energivalensi ini dinamakan energi celah pita (*energy gap*) yang merupakan energi minimal yang dibutuhkan untuk memutuskan ikatan kovalen pada semikonduktor.

Fungsi distribusi elektron pada semikonduktor dapat dinyatakan dengan menggunakan fungsi distribusi Fermi-Dirac, yaitu:

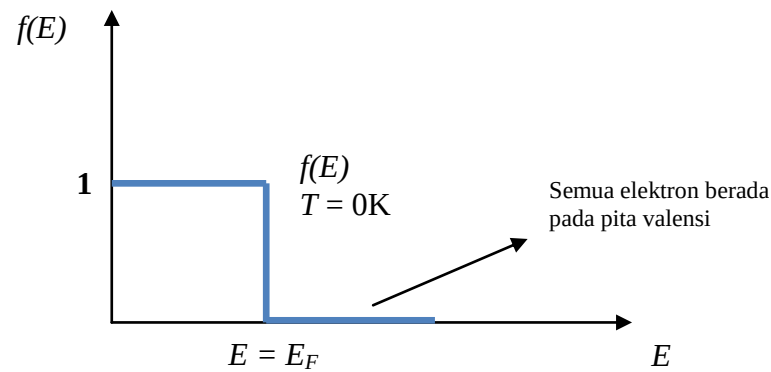
$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \quad (21)$$

1. Pada $T = 0$ K

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

Untuk $E < E_F$, maka $f(E) = \frac{1}{1 + e^{-\infty}} = 1$

Untuk $E > E_F$, maka $f(E) = \frac{1}{1 + e^{\infty}} = 0$



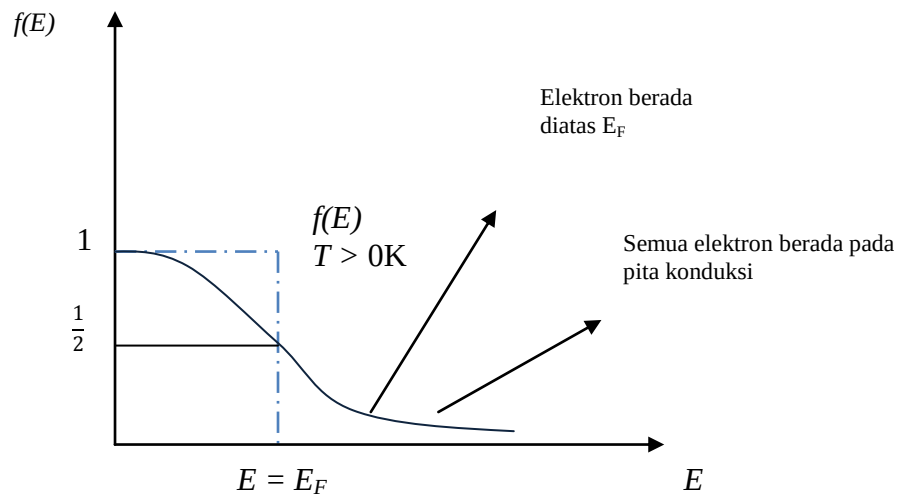
Gambar 7. Grafik distribusi Fermi-Dirac pada $T = 0$ K (Ashcroft/Mermin, 1976: 45).

2. Pada $T > 0$ K

Untuk $E < E_F$ maka $f(E) = 1 - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$

Untuk $E = E_F$ maka $f(E) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(0)} = \frac{1}{2}$

Untuk $E > E_F$ maka $f(E) = 1 - \frac{1}{1 + e^{\infty}} = \sim$



Gambar 8. Grafik distribusi Fermi-Dirac pada $T > 0$ K (Reka Rio, 1982: 31)

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

1. Semikonduktor Intrinsik

Semikonduktor intrinsik adalah semikonduktor yang murni dan belum disisipi atom-atom lain. Sifat kelistrikannya ditentukan oleh sifat-sifat alam yang melekat pada unsur itu sendiri (Nyoman Suwitra, 1989: 202). Contoh dari semikonduktor murni adalah silikon dan germanium. Dalam semikonduktor intrinsik, banyaknya *hole* di pita valensi sama dengan banyaknya elektron bebas 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

$$n = p = n_i \quad (22)$$

dimana n_i disebut konsentrasi atau rapat intrinsik.

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

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (23)$$

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

Ciri-ciri yang menonjol dari semikonduktor intrinsik adalah :

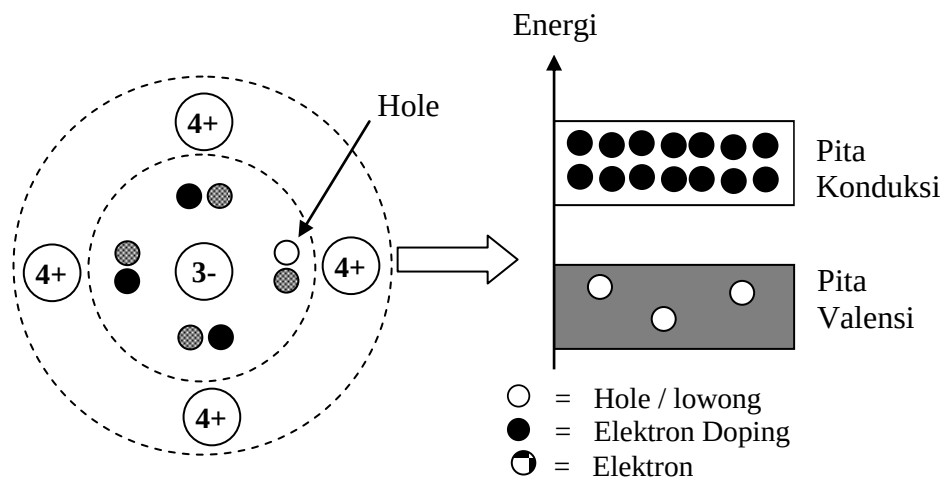
1. Jumlah elektron dalam pita konduksi sama dengan jumlah hole dalam pita valensi.
2. Energi Fermi terletak ditengah-tengah energi gap.
3. Elektron memberikan sumbangan terbesar terhadap arus, tetapi sumbangan hole juga berperan penting.
4. Ada sekitar 1 atom diantara 10^9 atom yang memberikan sumbangan terhadap hantaran listrik (Nyoman Suwitra, 1989: 222-227).

2. Semikonduktor Ekstrinsik

Semikonduktor ekstrinsik adalah semikonduktor yang tidak murni (setelah disisipi atom-atom pengotor) yaitu dengan cara memasukkan elektron atau *hole* yang berlebih. Semikonduktor jenis ini sifat konduktivitas listriknya ditentukan oleh atom pengotor yang disisipkan pada semikonduktor tersebut (*doping*). Semikonduktor ekstrinsik dibagi menjadi dua macam 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 negatif pada kristal yang netral. Karena atom pengotor (*dopan*) menerima elektron dari pita valensi, maka atom pengotor ini disebut sebagai atom akseptor (*acceptor*). Semikonduktor yang didopping dengan atom-atom akseptor ini dinamakan semikonduktor tipe-p (*p-type semiconductor*) dimana “p” adalah kependekan dari “positif” karena pembawa muatan positif jauh melebihi pembawa muatan negatif, Gambar 8 menunjukkan tingkat energi semikonduktor tipe-p. Di dalam semikonduktor tipe-p terbentuk tingkat energi yang letaknya sedikit diatas pita valensi. Oleh karena energi yang diperlukan elektron untuk meninggalkan pita valensi dan mengisi tingkat energi akseptor kecil sekali, maka *hole-hole* yang dibentuk oleh elektron-elektron ini merupakan pembawa muatan mayoritasnya adalah *hole* di dalam pita valensi sedangkan pembawa muatan minoritasnya adalah elektron di dalam pita konduksi.



Gambar 9. Tingkat energi semikonduktor tipe-p (Reka Rio, 1982: 12).

b) Semikonduktor tipe-n

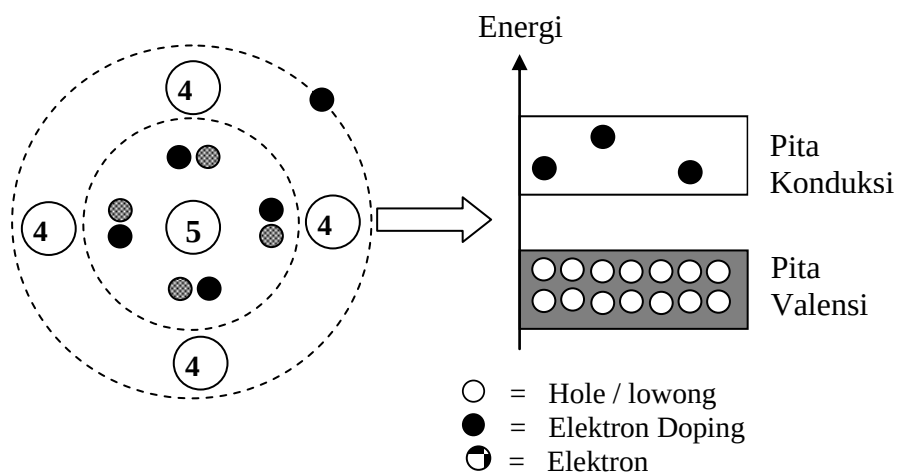
Semikonduktor tipe-n pada umumnya berasal dari semikonduktor intrinsik yang diberi atom pengotor dari kelompok *pentavalen* (atom bervalensi lima). Empat dari lima elektron valensi akan mengisi ikatan kovalen dan yang kelima tidak berpasangan hanya terikat sangat lemah, sehingga akan mudah terlepas dan dapat disebut sebagai pembawa muatan yang bebas.

Pada diagram tingkat energi semikonduktor tipe-n, tingkat energi elektron yang kehilangan ikatan ini muncul sebagai tingkat diskrit dalam energi gap tepat dibawah pita konduksi, sehingga energi yang diperlukan elektron ini untuk bergerak menuju ke pita konduksi menjadi sangat kecil. Dengan demikian akan sangat mudah terjadi eksitasi pada suhu kamar. Gambar 9 menunjukkan gambar tingkat energi semikonduktor tipe-n. Tingkat energi elektron ini dinamakan arus donor dan elektron pengotor ini disebut donor, karena elektron ini 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 akan berkurang. Pada tipe ini mayoritas pembawa muatan adalah elektron, sedangkan hole merupakan pembawa muatan minoritas. Berkurangnya hole ini disebabkan karena dengan bertambah banyaknya elektron, maka kecepatan rekombinasi elektron dengan hole meningkat.

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.



Gambar 10. Tingkat energi semikonduktor tipe-n (Reka Rio,1982: 12).

3. Tipe Arus Pada Semikonduktor

Keberadaan elektron dan *hole* pada semikonduktor akan mempengaruhi karakteristik listrik pada bahan tersebut. Ada dua jenis arus listrik yang terjadi pada semikonduktor yaitu arus hanyut (*drift*) dan arus difusi (Reka Rio,1982: 38-41).

1. Arus Hanyut (*drift*)

Ketika semikonduktor diberi medan listrik E , maka partikel-partikel bermuatan dalam semikonduktor akan bergerak (hanyut) dengan laju yang berbanding lurus dengan medan listriknya.

$$v_n = -\mu_n E \quad (24)$$

$$v_p = \mu_p E \quad (25)$$

Dimana v_n, v_p adalah laju hanyut pada elektron dan *hole* (cm/s), μ_n dan μ_p adalah mobilitas dari elektron dan *hole* ($\text{cm}^2/\text{V.m}$). Tanda negatif pada Persamaan 24 menandakan bahwa kecepatan *drift* elektron berlawanan arah dengan medan listrik E yang diberikan. Kecepatan *drift* ini sendiri lalu akan menghasilkan kerapatan arus *drift* untuk elektron dan *hole* yang besarnya adalah:

$$J_n = (-q)nv = q_n\mu_n E \quad (26)$$

$$J_p = (+q)nv = q_p\mu_p E \quad (27)$$

dimana n adalah konsentrasi elektron, p adalah konsentrasi *hole*, dan J adalah rapat arus (A/m^3).

2. Arus Difusi.

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 hukum difusi sebagai berikut:

$$J_p = -D \frac{dp}{dx} \quad (28)$$

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

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad (29)$$

$$J_n = -qD_n \frac{dn}{dx} \quad (30)$$

Dengan J_n dan J_p adalah rapat arus (A/m^2), d_n dan d_p adalah konsentrasi pembawa muatan ($m^2/volt.s$), D_n dan D_p adalah koefisien difusi, x adalah posisi (m) dengan demikian rapat arus total pada semikonduktor merupakan hasil penjumlahan dari arus hanyut dan arus difusi,

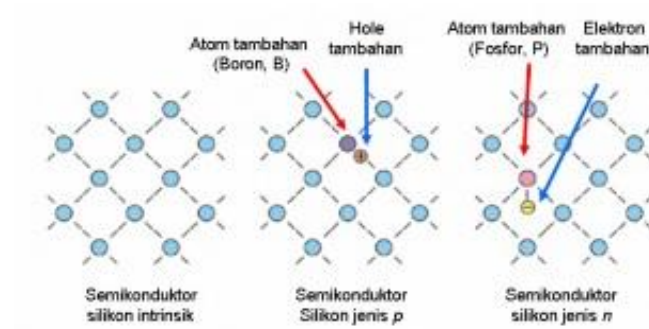
$$J_n = qn\mu_n\varepsilon + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (31)$$

$$J_p = qn\mu_p\varepsilon - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (32)$$

4. Sistem Kerja Semikonduktor pada Sel Surya

Proses konversi cahaya matahari menjadi energi listrik dimungkinkan karena bahan material yang menyusun sel surya berupa semikonduktor. Sel surya tersusun atas 2 (dua) jenis semikonduktor, yakni semikonduktor tipe-*n* dan semikonduktor tipe-*p*.

Semikonduktor tipe-n merupakan semikonduktor yang memiliki kelebihan elektron, sehingga kelebihan muatan negatif (n =negatif). Semikonduktor tipe-p memiliki kelebihan *hole*, sehingga disebut dengan p (p =positif) karena kelebihan muatan positif. Cara membuat semikonduktor tipe-n atau tipe-p dengan mensisipkan unsur lain ke dalam semikonduktor tersebut, sehingga kita dapat mengontrol tipe semikonduktor, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 11.

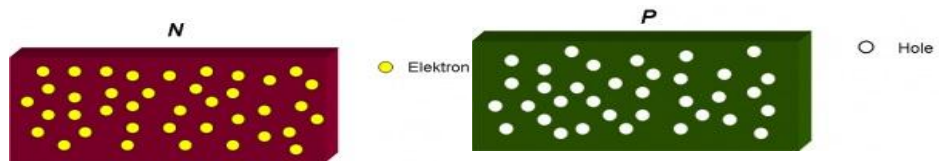


Gambar 11. Cara mengontrol pembuatan semikonduktor.

Pada awalnya, pembuatan dua jenis semikonduktor ini dimaksudkan untuk meningkatkan tingkat konduktivitas atau tingkat kemampuan daya hantar listrik dan panas semikonduktor alami. Di dalam semikonduktor intrinsik, elektron maupun *hole* memiliki jumlah yang sama. Kelebihan elektron atau *hole* dapat meningkatkan daya hantar listrik maupun panas dari sebuah semikonduktor.

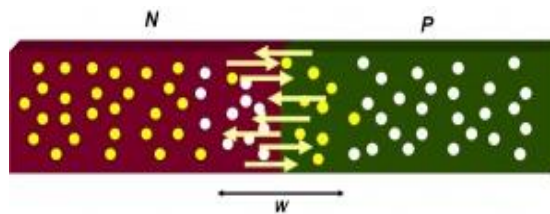
Semikonduktor-n dan semikonduktor-p ini apabila disatukan akan membentuk sambungan p-n (sambungan metalurgi/*metallurgical junction*) yang dapat digambarkan sebagai berikut:

- a. Semikonduktor jenis p dan n sebelum disambung.



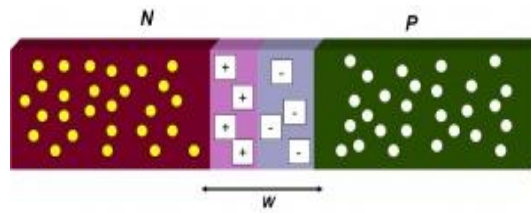
Gambar 12. Semikonduktor jenis p dan n sebelum disambung.

- b. Sesaat setelah dua jenis semikonduktor ini disambung, terjadi perpindahan elektron-elektron dari semikonduktor tipe-n menuju semikonduktor tipe-p, dan perpindahan *hole* dari semikonduktor tipe-p menuju semikonduktor tipe-n. Perpindahan elektron maupun *hole* ini hanya sampai pada jarak tertentu dari batas sambungan awal.



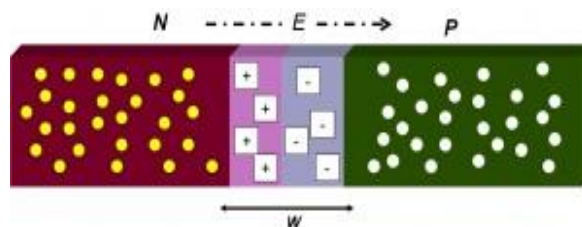
Gambar 13. Penyambungan dua jenis semikonduktor. (Reka Rio, 1982: 59)

- c. Elektron dari semikonduktor-n bersatu dengan *hole* pada semikonduktor-p yang mengakibatkan jumlah *hole* pada semikonduktor tipe-p akan berkurang. Daerah ini akhirnya berubah menjadi lebih bermuatan negatif. Pada saat yang sama, *hole* dari semikonduktor tipe-p bersatu dengan elektron yang ada pada semikonduktor-n yang mengakibatkan jumlah elektron di daerah ini berkurang. Daerah ini akhirnya lebih bermuatan positif.



Gambar 14. Pembentukan daerah deplesi. (Reka Rio, 1982: 60)

- d. Daerah negatif dan positif ini disebut dengan daerah deplesi (*depletion region*). Lebar daerah deplesi ditandai dengan huruf w .
- e. Elektron maupun *hole* yang ada pada daerah deplesi disebut dengan pembawa muatan minoritas (*minority charge carriers*) karena keberadaannya di jenis semikonduktor yang berbeda.
- f. Adanya perbedaan muatan positif dan negatif di daerah deplesi, maka timbul dengan sendirinya medan listrik internal E dari sisi positif ke sisi negatif, yang mencoba menarik kembali *hole* ke semikonduktor tipe-p dan elektron ke semikonduktor tipe-n. Medan listrik ini cenderung berlawanan dengan perpindahan *hole* maupun elektron pada awal terjadinya daerah deplesi.



Gambar 15. Medan listrik pada daerah deplesi. (Reka Rio: 59, 1982).

- g. Adanya medan listrik mengakibatkan sambungan p-n berada pada titik setimbang, yakni saat dimana jumlah *hole* yang berpindah dari

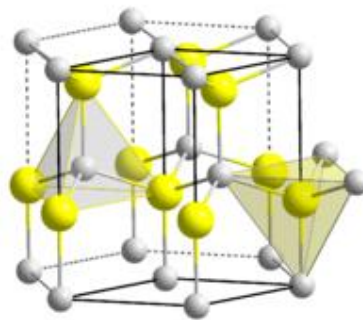
semikonduktor tipe-p ke n dikompensasi dengan jumlah *hole* yang tertarik kembali ke arah semikonduktor-p akibat medan listrik E. Begitu pula dengan jumlah elektron yang berpindah dari semikonduktor-n ke p, dikompensasi dengan mengalirnya kembali elektron ke semikonduktor-n akibat tarikan medan listrik E. Dengan kata lain, medan listrik E mencegah seluruh elektron dan *hole* berpindah dari semikonduktor yang satu ke semikonduktor yang lain. Pada sambungan p-n inilah proses konversi cahaya matahari menjadi listrik terjadi.

5. Bahan Semikonduktor Cadmium Selenida (CdSe)

Cadmium Selenida adalah senyawa biner dari *Cadmium* (Cd) dan *Selenium* (Se) yang berwujud padat dalam golongan II – VI (terner). Cadmium (Cd), logam kebiruan yang lunak, termasuk golongan IIB pada tabel berkala mempunyai nomor atom 48, atom relatif (Ar) 112,41, titik lebur 320,9 °C dan titik didih 765 °C. Nama unsur diturunkan dari nama kalamina, yakni zink karbonat $ZnCO_3$, sebab cadmium biasa dijumpai bersama-sama dalam dalam biji zinc, seperti *sphalerit* (ZnS), walaupun juga dijumpai sebagai mineral mineral *grinokit* (CdS). Cadmium biasa dihasilkan bersamaan ketika bijih seng (Zn), tembaga (Cu) dan timbal (Pb) direduksi.

Selenium (Se), unsur metaloid yang termasuk golongan VI pada tabel berkala, nomor atom 34, Ar 78,96, titik lebur 217 °C (kelabu), titik didih 684,9 °C. Ada sejumlah bentuk alotrop, antara lain *selenium kelabu*, *merah* dan *hitam*. Unsur ini dijumpai dalam bijih *sulfide* dari logam lain. *Selenium* merupakan semikonduktor.

CdSe adalah kristal berstruktur heksagonal terlihat pada Gambar.15 dan merupakan bahan umum semikonduktor fotokonduktif. CdSe memiliki titik leleh pada suhu 1350 °C. CdSe Memiliki energi gap 1,7 eV pada suhu 300 °K. Karena energi gap ini, CdSe mempunyai tahanan yang sangat tinggi pada suhu kamar dan CdSe merupakan semikonduktor tipe-n. Selain untuk aplikasi sel surya yang memiliki efisiensi tinggi, CdSe juga digunakan pada perangkat optoelektronik, laser diode, nanosensing dan *biomedical imaging*.



Gambar 16. Struktur Kristal CdSe

(http://www.webelements.com/compounds/cadmium/cadmium_selenide.html)

6. Bahan semikonduktor CdTe

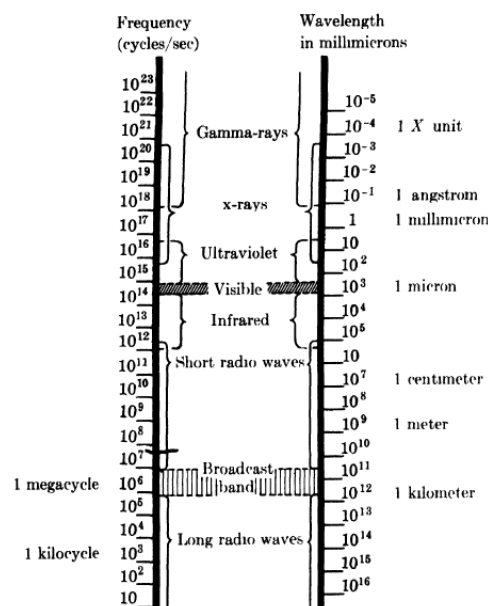
Cadmium Tellerida adalah salah satu anggota dalam campuran golongan II – VI (ternary). Cadmium Tellerida berwujud padatan, merupakan paduan antara dua unsur yaitu Cadmium dan Tellenium. Cadmium Tellenium memiliki titik leleh pada suhu 1092 °C dan titik didih pada suhu 1130 °C. CdTe memiliki energi gap 1,14 eV pada suhu 300 °K. CdTe digunakan untuk membuat sel surya film tipis, terhitung sekitar 6 % dari semua sel surya terpasang pada tahun 2010.

Lapisan tipis CdTe termasuk yang paling rendah biayanya untuk jenis sel surya, meskipun perbandingan biaya total terpasang tergantung pada instalasi

ukuran dan faktor lainnya, dan berkembang sangat pesat dari tahun ke tahun. Pada tahun 2010, sekitar 1,5 GWP sel surya dari CdTe diproduksi. Selain dijadikan sebagai sel surya CdTe pun bisa diaplikasikan menjadi detektor infra merah, yaitu dengan paduan menggunakan merkuri.

B. Sel Surya

Cahaya matahari merupakan gelombang elektromagnetik sebagaimana gelombang radio atau sinar-x. Matahari memiliki spektrum di cahaya tampak dan tidak tampak, yakni inframerah dan ultraviolet. Gambar 17 menunjukkan spektrum gelombang elektromagnetik.



Gambar 17. Spektrum elektromagnetik cahaya sebagai gelombang dengan panjang gelombang dan frekuensi yang berbeda-beda (Cullity, 1956: 2).

Energi matahari pada pemanfaatannya sebagai sumber energi, telah dikembangkan suatu teknologi yang mampu mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Teknologi ini lebih dikenal dengan istilah sel surya atau

photovoltaic. Sel surya adalah suatu elemen aktif yang mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Sel surya pada umumnya memiliki ketebalan minimum 0,3 mm, yang dibuat dari irisan bahan semikonduktor dengan kutub positif dan kutub negatif. Apabila suatu cahaya jatuh pada semikonduktor maka kedua kutubnya timbul perbedaan tegangan, yang tentunya dapat menyalakan lampu, menggerakkan motor-motor listrik dan lain-lain. Untuk mendapatkan daya yang lebih besar, sel surya dapat dihubungkan seri atau paralel tergantung sifat penggunaannya.

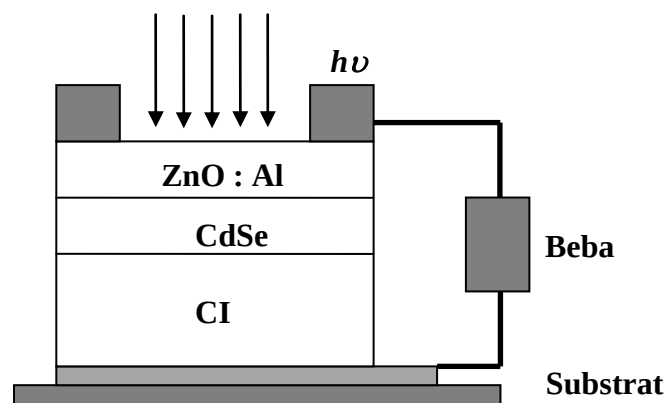
Prinsip dasar pembuatan sel surya adalah memanfaatkan efek fotovoltaiik, yaitu suatu efek yang dapat mengubah langsung cahaya matahari menjadi energi listrik. Prinsip ini pertama kali ditemukan oleh Alexander Edmond Bequerel, seorang ahli fisika berkebangsaan Perancis tahun 1839 yang saat itu teorinya belum begitu berkembang.

Sel surya paling sederhana terdiri dari persambungan dua semikonduktor tipe-p dan tipe-n (*p-n junction*) yang dikenai sinar matahari terjadi aliran elektron (aliran arus listrik). Proses penghasilan energi listrik itu diawali dengan proses pemutusan ikatan elektron pada atom-atom yang tersusun dalam kristal semikonduktor ketika diberikan sejumlah energi (hf). Listrik tenaga surya diperoleh dengan melalui sistem *fotovoltaiik*, yaitu suatu sistem yang dapat mengubah langsung cahaya matahari menjadi energi listrik.

Sifat sel surya secara keseluruhan akan sangat ditentukan oleh sifat fisis tiap-tiap lapisan penyusunnya. Beberapa macam sifat fisis masing-masing lapisan diselidiki dan dihubungkan dengan efisiensi sel surya adalah struktur kristalnya,

hambatan listriknya, daerah panjang penyerap atau refleksinya, tingkat atau lebar daerah energi gap dan konsentrasi atau jenis pembawa muatannya. Secara umum, sifat fisis yang menentukan penggunaan suatu bahan sel surya adalah sifat listrik dan sifat optiknya.

Sel surya merupakan suatu semikonduktor sambungan p-n dari silikon kristal tunggal. Gambar 18 menunjukkan bentuk sel surya konvensional. Dengan menggunakan efek fotoelektrik dari bahan semikonduktor, sel surya dapat langsung mengkonversi sinar matahari menjadi listrik searah (dc).



Gambar 18. Bentuk sel surya konvensional

C. Lapisan Tipis (*Thin Film*)

Lapisan tipis adalah suatu lapisan dari bahan organik, anorganik, metal maupun campuran metal-organik (*organometallic*) dengan ketebalan dalam orde-nm (nanometer) hingga μm (mikrometer) yang memiliki sifat-sifat konduktor, semikonduktor, superkonduktor, maupun isolator. Bahan-bahan lapisan tipis akan memperlihatkan sifat-sifat khusus, yaitu mempunyai sifat-sifat bahan unik yang diakibatkan oleh proses pertumbuhan lapisan tipis. Aplikasi lapisan tipis saat ini telah menjangkau hampir semua bidang industri baik dalam pembuatan

piranti elektronik seperti kapasitor, transistor, fotodetektor, sel surya, rangkaian hidrid, dan teknologi mikroelektronika; bidang optik dalam pembuatan lapisan antirefleksi, filter interferensi, cermin reflektor tinggi, kacamata pelindung cahaya, transmisi daya tinggi, maupun bidang mekanik dalam pembuatan lapisan keras sebagai bahan pelindung terhadap keausan dan anti korosi.

Penerapan lapisan tipis diawali pada pertengahan abad XIX yakni pada tahun 1852 ketika Grove melakukan penelitian lucutan listrik dalam gas bertekanan rendah dimana nampak terbentuk lapisan pada dinding lucutan pijar di sekitar elektroda negatif. Kemudian pada tahun 1857, Faraday berhasil membuat lapisan tipis dari logam dengan metode evaporasi. Dalam perkembangan berikutnya, penerapan teknologi lapisan tipis sudah menjangkau semua bidang dan semakin banyak diteliti.

Proses pertumbuhan lapisan tipis melewati tiga (3) tahapan utama yaitu:

- a. Pembentukan jenis atom, molekul, atau ion.
- b. Transport jenis atom, molekul, atau ion.
- c. Kondensasi pada permukaan substrat secara langsung atau melalui reaksi kimia atau elektrokimia untuk membentuk suatu deposisi padatan.

D. Metode CSVT

CSVT merupakan modifikasi khusus untuk metode transport uap yang masih dapat digolongkan dalam jenis deposisi lapisan secara kimia atau dikenal dengan *Chemical Vapour Deposition* (CVD). Pada metode CVD konvensional, bahan semikonduktor dideposisi dalam bentuk uap senyawa semikonduktor

dengan bahan organik atau halogen yang akan terdekomposisi dan terdeposisi pada substrat.

Pada metode CSVT, substrat diletakkan diatas sumber dengan diberi jarak penyangga (spacer) yang terjadi pada tabung reaktor vertikal tertutup dengan diameter tertentu. Diameter dalam tabung reaktor berkisar pada 20 mm dan panjang reaktornya 10-20 cm (Djessas K dan Masse G, 2000: 2135). Metode ini menekankan kedekatan jarak antara sumber dengan substrat agar uap yang berasal dari sumber dapat sebanyak mungkin terdeposisi pada substrat. Reaktor dihampakan agar uap dari sumber deposisi sebanyak mungkin pada substrat. Kedekatan jarak antara sumber dengan substrat merupakan hal yang sangat penting pada metode ini karena kondisi hampa yang digunakan tidak terlalu tinggi sehingga jarak tersebut diharapkan tidak terlalu jauh dari ruang bebas molekul gas. Ruang bebas molekul gas adalah jarak rata-rata yang ditempuh sebuah molekul sebelum bertumbukan dengan molekul lain.

Semua proses dalam metode CSVT terjadi dalam reaktor tertutup. Agar uap dari sumber terdeposisi sebanyak mungkin pada substrat, reaktor dihampakan hingga 10^{-3} Torr ($1 \text{ Bar} = 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ Torr}$, maka $10^{-3} \text{ Torr} = 10^2 \text{ Pa}$), penghampaan tabung reaktor dilakukan untuk memperbesar ruang bebas molekul gas dan untuk menjaga agar tidak terjadi proses oksidasi.

Tabung reaktor diletakkan tepat diatas tungku pemanas. Posisi tabung reaktor yang tegak lurus menimbulkan gradien temperatur antara sumber dengan substrat. Temperatur substrat lebih rendah dibanding temperatur sumber. Temperatur substrat yang rendah menyebabkan tekanan pada substrat lebih kecil

sehingga molekul gas bergerak ke arah substrat dan akan terdeposisi pada substrat. Karakteristik lapisan tipis yang terbentuk berkaitan erat dengan temperatur sumber, temperatur substrat, jarak antara sumber dengan substrat, serta konsentrasi Iodium.

Pada dasarnya metode CSVT merupakan proses evaporasi dalam ruang hampa. Proses ini meliputi :

1. Perubahan fasa dari padat atau cair menjadi fasa gas.
2. Transfer uap dari sumber ke substrat dimana tekanannya lebih rendah.
3. Deposisi uap pada substrat.

Pemilihan metode *CSVT* , karena kualitas hasil lapisan tipis (*thin film*) hanya dikendalikan oleh tingkat *homogenitas* dari target yang akan dijadikan lapisan tipis dan karakteristik lapisan tipis yang dihasilkan berkaitan erat dengan parameter yang digunakan selama proses berlangsung. Metode ini juga mempunyai rapat arus yang besar sehingga memungkinkan terjadinya laju deposisi yang tinggi. Selain itu, keuntungan dari penggunaan teknik CSVT adalah alatnya sederhana, hasil lapisan tipis bersesuaian dengan bahan target atau sumber, menggunakan katalisator *iodine* sehingga tidak memerlukan suhu dan tekanan yang tinggi.

E. Karakterisasi Lapisan Tipis

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 teknik, yaitu *X-Ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive Analysis X-Ray* (EDAX).

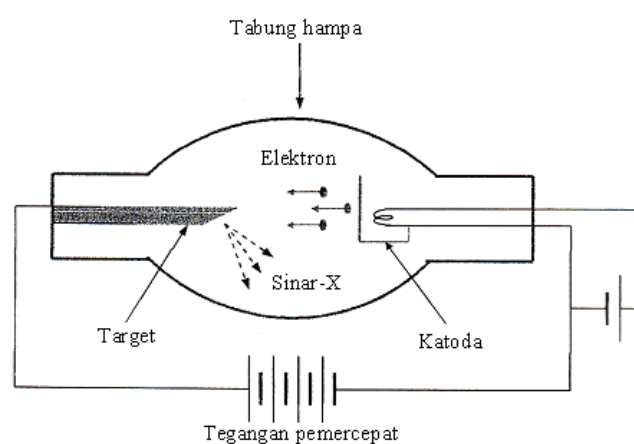
1. X- Ray Diffraction (XRD)

Teknik *X-Ray Diffraction* (XRD) berperan penting dalam proses analisis padatan kristal maupun amorf. Teknik *X-Ray Diffraction* (XRD) adalah metode karakterisasi lapisan yang digunakan untuk analisis struktur kristal, karena setiap unsur atau senyawa memiliki pola tertentu. Pada 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).

Hasil 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.

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 *bremstrahlung*.



Gambar 19. Diagram sinar x.
(Arthur Beiser, 1992: 62)

Berkas elektron dihasilkan oleh katoda yang dipanaskan dengan *filament*, kemudian elektron bermuatan negatif tertarik menuju muatan positif anoda pada target yang mempunyai temperatur tinggi, hal ini terjadi karena adanya beda potensial antara anoda dan katoda. Apabila beda potensial antara katoda dan anoda diberi lambang V_0 (volt), maka saat elektron mengenai permukaan anoda dapat dihitung besar energi sebagai berikut :

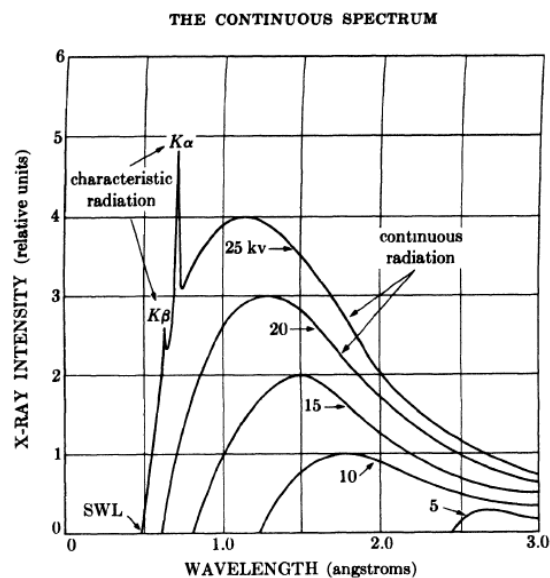
$$E_K = eV_0$$

karena adanya interaksi antara elektron berenergi E_k dengan logam anoda maka terjadilah pancaran sinar-X.

Radiasi spektrum kontinyu terjadi akibat perlambatan mendadak gerak elektron dari katoda pada saat mendekati anoda akibat pengaruh gaya elektrostatika. Energi radiasi pada spektrum kontinyu akan naik seiring dengan bertambahnya nomor atomik terget 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. Jika kekosongan kulit-K diisi oleh elektron dari kulit-L yang mempunyai tingkat energi lebih tinggi maka radiasi emisi ini disebut radiasi K_{α} , sehingga panjang gelombang dapat diperoleh dengan persamaan berikut :

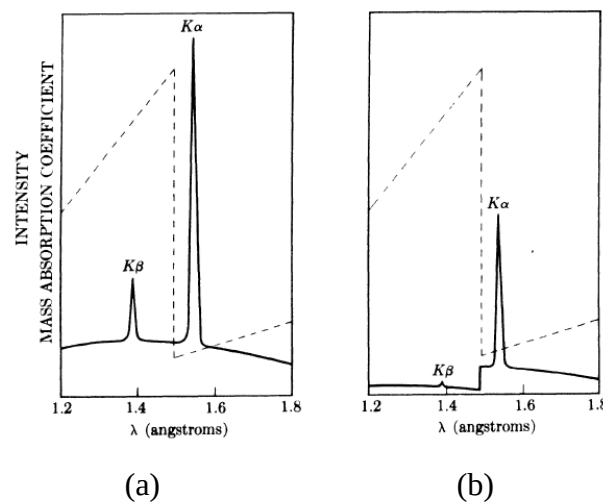
$$h\nu = E_L - E_K$$

tetapi jika kekosongan kulit-K diisi oleh elektron dari kulit-M maka radiasi emisinya disebut K_{β} seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20.



Gambar 20. Spektrum radiasi sinar-x kontinyu dan diskret.
(Sumber: Cullity, 1956: 5)

Pada Gambar 20 spektrum radiasi terlihat jelas bahwa terdapat lebih dari satu sinar-x karakteristik. Hal ini terjadi karena adanya transisi antara tingkat energi yang berbeda. Sinar-x yang monokromatik sangat dibutuhkan untuk menganalisis struktur kristal dari bahan paduan maka perlu dilakukan proses penyaringan (*filter*) yang sesuai dengan menggunakan logam bernomor atom lebih kecil dari target.

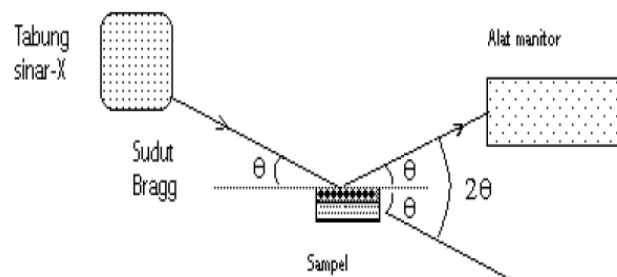


Gambar 21. Sinar-x karakteristik (Cullity, 1956: 16).

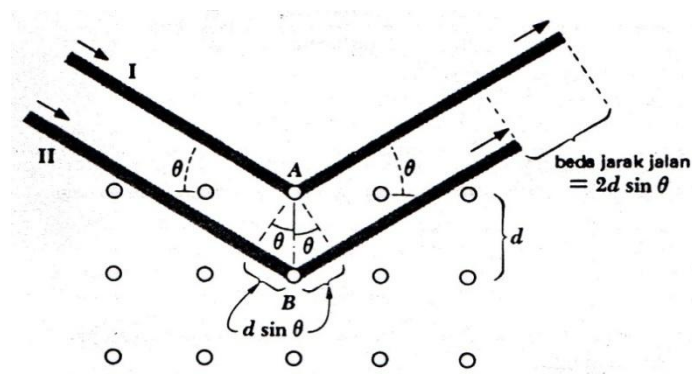
Gambar 21 (a) menunjukkan sinar-x yang masih bersifat polikromatik yang diberi *filter*. Gambar 21 (b) sinar-x monokromatik setelah melalui tahap penyaringan dengan *filter*.

Suatu berkas sinar-x monokromatik yang dilewatkan pada suatu bahan maka akan terjadi penyerapan (*absorpsi*) dan penghamburan (*scattering*) berkas sinar oleh atom-atom dalam bahan tersebut. Berkas sinar-x yang jatuh dihamburkan kesegala arah, tetapi karena keteraturan letak atom-atom, pada arah-arrah tertentu gelombang hambur itu akan mengalami interferensi konstruktif (mengalami penguatan), sedang yang lainnya akan mengalami

interferensi destruktif(mengalami penghilangan) (Arthur Beisser, 1992: 65). 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 sebagainya. Rancangan skematik spektrometer sinar-x yang didasarkan pada analisis Bragg ditunjukkan pada Gambar 22. 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 dan difraktogram.



Gambar 22. Skema dasar XRD
(Sumber: Arthur Beiser, 1992: 74)



Gambar 23. Difraksi Bragg
(Sumber: Arthur Beiser, 1992: 68)

Seberkas sinar mengenai kisi pada bidang pertama dan pada bidang berikutnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 23. Jarak antara bidang kisi adalah d , sedangkan θ adalah sudut difraksi. Berkas-berkas tersebut mempunyai panjang gelombang λ , dan jatuh pada bidang kristal dengan jarak d dan sudut θ . Agar mengalami interferensi yang konstruktif maka kedua berkas tersebut harus memiliki beda jarak $n\lambda$. Sedangkan beda jarak lintasan kedua berkas adalah $2d \sin \theta$. Interferensi konstruktif terjadi jika beda jalan sinar adalah kelipatan bulat panjang gelombang λ , sehingga dapat dinyatakan:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (33)$$

Persamaan ini dikenal dengan hukum Bragg. Pemantulan Bragg dapat terjadi jika $\lambda \leq 2d$, dengan n adalah bilangan bulat (1,2,3...).

Arah berkas yang dipantulkan oleh atom dalam kristal ditentukan oleh geometri dari kisi kristal yang bergantung pada orientasi dan jarak bidang kristal. Suatu kristal yang memiliki simetri heksagonal ($a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$) memiliki konstanta kisi a , sudut-sudut berkas yang didifraksikan dari bidang-bidang kristal (hkl) dapat dihitung dengan rumus jarak antar bidang sebagai berikut:

$$\frac{1}{d^2_{hkl}} = \left[\frac{4}{3} \frac{(h^2 + hk + k^2)}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \right] \quad (34)$$

Dengan memasukkan persamaan Bragg, didapatkan persamaan:

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (35)$$

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4} \left[\frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \right]$$

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4a^2} \left[\frac{4}{3} (h^2 + hk + k^2) + \frac{l^2}{\left(\frac{c}{a}\right)^2} \right] \quad (36)$$

Untuk menghitung harga a , maka dicari indeks Miller (hkl) yang mempunyai harga l sama dengan 0, maka diperoleh persamaan :

$$a = \frac{\lambda}{\sin \theta} \sqrt{\left(\frac{h^2 + hk + k^2}{3} \right)} \quad (37)$$

Untuk menghitung nilai c , maka dicari indeks Miller (hkl) yang mempunyai harga h dan k sama dengan 0, sehingga :

$$c = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} l \quad (38)$$

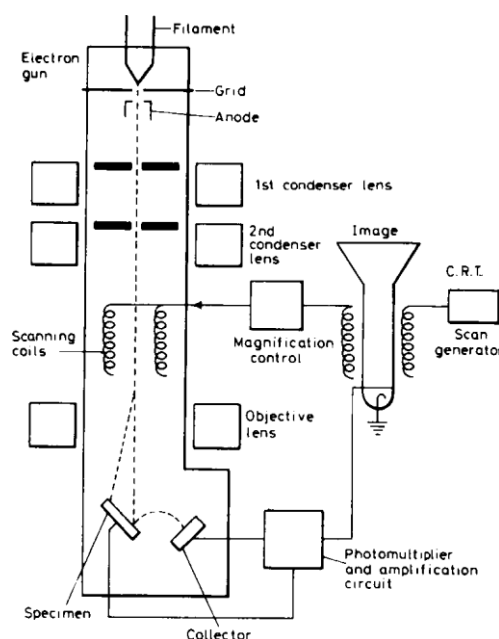
Penentuan orientasi kristal dilakukan dengan mengamati pola berkas difraksi sinar-X yang dipantulkan oleh kristal. Untuk XRD, pola difraksi diamati sebagai fungsi sudut 2θ . Pola difraksi yang terjadi kemudian dibandingkan dengan JCPDS sebagai data standar.

2. Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Elektron Microscopy (SEM) dapat digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan bahan. Karakterisasi 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 Elektron Micrograp* 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. Hasil SEM yang berupa

gambar morfologi menyajikan bentuk permukaan bahan dengan berbagai lekukan dan tonjolan.

Prinsip kerja dari alat ini dapat dijelaskan sebagai berikut: sumber elektron dari filamen yang terbuat dari tungsten memancarkan berkas elektron. Jika elektron tersebut berinteraksi dengan bahan (spesimen) maka akan menghasilkan 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 spesimen ditangkap oleh detektor SE (*Secondary Electron*) yang kemudian diolah dan diperkuat oleh *amplifier* dan kemudian divisualisasikan dalam monitor sinar katoda (CRT). Skema dasar SEM disajikan pada Gambar 24.

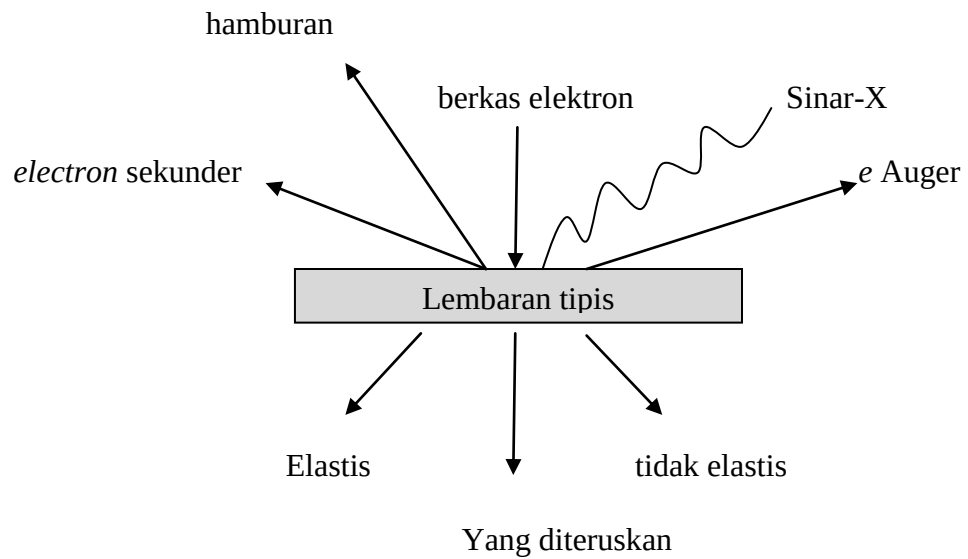


Gambar 24. Skema dasar SEM.
(Sumber : Smallman dan Bishop, 1999: 144)

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

Teknik EDAX (*Energi Dispersive Analysis X-Ray*) dapat digunakan untuk mengetahui kandungan berbagai unsur kimia dari suatu material. Sistem analisis EDAX bekerja sebagai fitur yang terintegrasi dengan SEM dan tidak dapat bekerja tanpa *Scanning Elektron Microscopy* (SEM). Apabila Teknik EDAX dan SEM digabungkan sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang dimiliki oleh fasa yang terlihat pada struktur mikro. Prinsip kerja *Energi Dispersive Analysis X-Ray* yaitu dengan menangkap dan mengolah sinyal *flourensensi* 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 sebagian lagi akan diserap dan menembus *specimen*. Bila *specimennya* cukup tipis, sebagian besar ditransmisikan dan beberapa elektron akan dihamburkan secara tidak elastis. Interaksi dengan atom dalam *specimen* akan menghasilkan pelepasan elektron energi rendah, foton sinar-X dsn elektron auger, yang semuanya dapat digunakan untuk mengkarakterisasi material. Gambar 25 mengenai elektron-elektron apabila mengenai *specimen*.



Gambar 25 . Hamburan dari elektron yang jatuh pada lembaran tipis
(Smallman, 1999: 142)

Interaksi antara elektron dengan atom pada sampel akan menghasilkan pelepasan elektron energi rendah, foton sinar-X dan elektron auger, yang kesemuanya bisa digunakan untuk mengkarakterisasi material. (Smallman, 1999: 142). Elektron sekunder adalah elektron yang dipancarkan dari permukaan kulit atom terluar yang dihasilkan dari interaksi berkas elektron jatuh dengan padatan 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. 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.