BAB II
KAJIAN TEORI

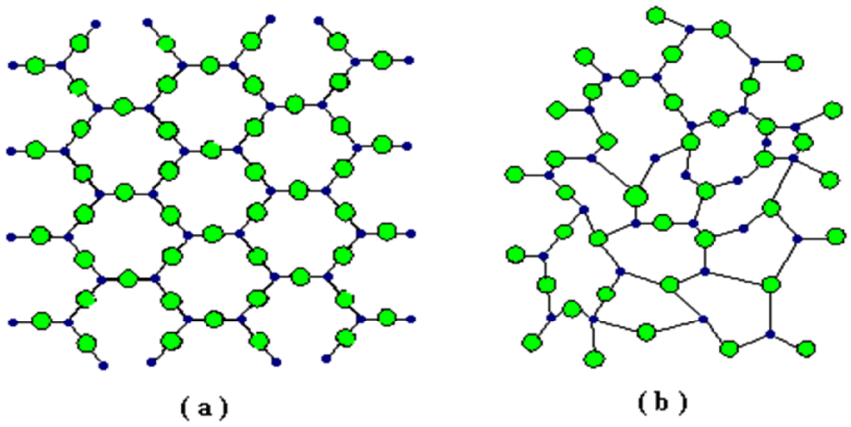
A. Kristal

Jika atom-atom bergabung membentuk padatan (*solid*), atom-atom itu mengatur dirinya sendiri dalam pola tataan tertentu yang disebut kristal (Malvino, 1981: 16). 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. 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 dalam suatu kisi kristal. Kumpulan atom penyusun kristal disebut dengan basis dan kedudukan atom-atom didalam ruang dinyatakan oleh kisi (Edi Istiyono, 2000: 1). Suatu zat padat disebut kristal apabila :

1. Atom-atom atau molekul-molekulnya tersusun dalam suatu pola tiga dimensi yang sangat teratur.
2. Tiap atom atau molekul berada pada kedudukan tertentu dalam ruang dan mempunyai jarak dan arah sudut yang tetap terhadap atom atau molekul lainnya (tersusun secara periodik).
3. Kristal mempunyai simetri *translational* yang jika digerakkan translasi oleh suatu vektor yang menghubungkan dua atom, bentuk kristal tetap sama seperti semula. (Yoshapat Sumardi, 2008).

Ditinjau dari strukturnya, zat padat dibagi menjadi tiga yaitu *monocrystal* (kristal tunggal), *polycrystal*, dan *amorf* (Ariswan, 2008: 1). Pada kristal tunggal (*monocrystal*), 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. *Polycrystal* dapat didefinisikan sebagai kumpulan dari kristal-kristal tunggal yang memiliki ukuran sangat kecil dan saling menumpuk yang membentuk benda padat.

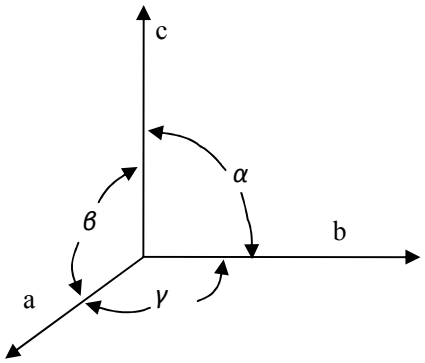
Berbeda dengan *monocrystal* dan *polycrystal*, *amorf* memiliki pola susunan atom-atom atau molekul-molekul yang acak dan tidak teratur secara berulang. *Amorf* terbentuk karena proses pendinginan yang terlalu cepat sehingga atom-atom tidak dapat dengan tepat menempati lokasi kisinya. Berikut gambaran untuk mengetahui susunan atom kristal dan *amorf* :



Gambar 1. (a). Susunan atom kristal, (b). Susunan atom *amorf*.
(Smallman dan Bishop, 2002: 13)

1. Struktur Kristal

Kristal yang sempurna merupakan susunan atom secara teratur dalam kisi ruang, 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*. 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. Struktur kristal dinyatakan dalam sumbu-sumbu kristal yang dikaitkan dengan parameter kisi dan sudut referensi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



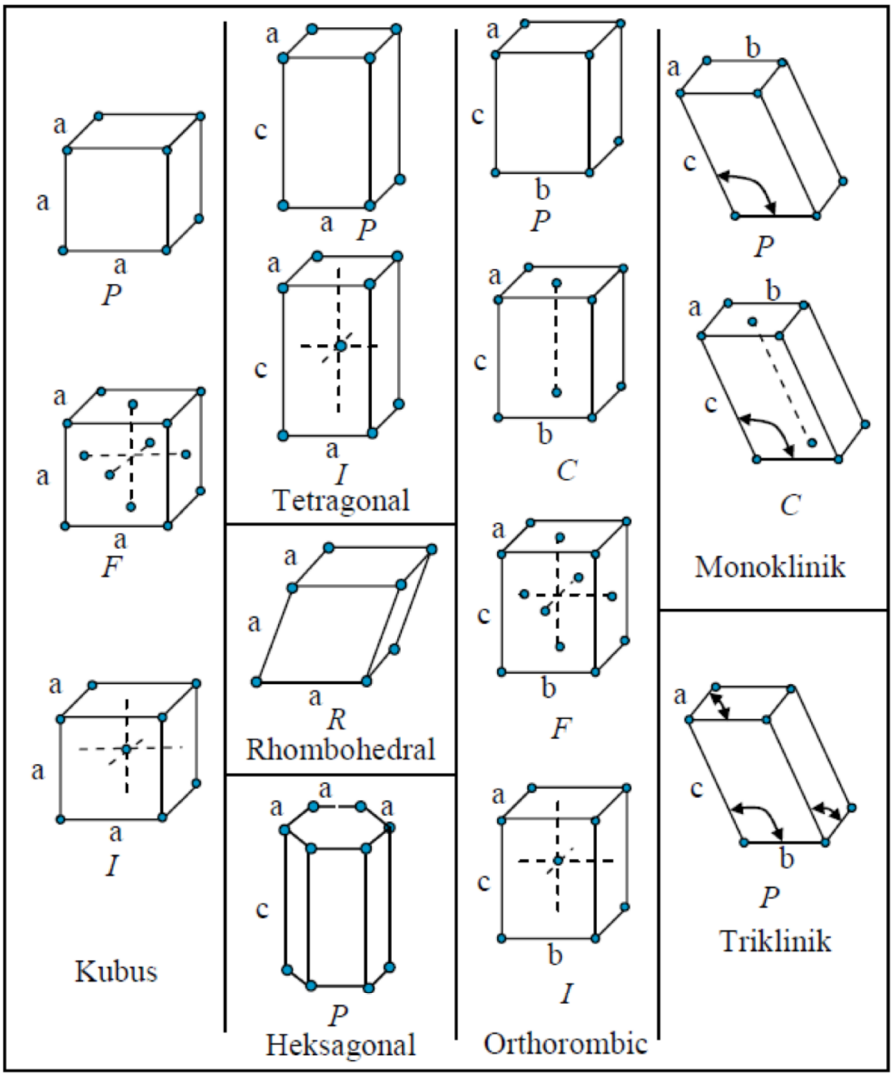
Gambar 2. Sumbu-sumbu dan sudut-sudut antar sumbu kristal.
(Edi Istiyono, 2000)

Sumbu-sumbu a, b, dan c adalah sumbu-sumbu yang dikaitkan dengan parameter kisi kristal. Sedangkan α, β, dan γ yang merupakan sudut antara

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) (Bravais, 1948). Seperti pada Tabel 2. dan Gambar 3.

Tabel 2. Tujuh sistem kristal dan empat belas kisi Bravais (Kittel, 1976: 15).

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



Gambar 3. Empat belas kisi Bravais (Cullity, 1956: 32).

Pada Gambar 3, 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; huruf R menunjuk pada sel primitif rhombohedral.

2. Parameter Kisi *Cubic*

Arah berkas yang dipantulkan ditentukan oleh geometri kisi, yang bergantung pada orientasi dan jarak bidang kristal. Kristal simetri *cubic* (a = b = c) dengan ukuran parameter kisi *a,* sudut difraksi berkas dari bidang kristal (*hkl*) dapat dihitung dengan mudah dari hubungan jarak interplanar.

$$= 2 \quad \sin \tag{1}$$

$$— = \quad \text{———} \tag{2}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan Bragg (1), maka didapatkan

$$\text{———} = \quad \text{———} \tag{3}$$

$$= — (h \ + \quad + \quad) \tag{4}$$

Untuk menghitung nilai *a*,

$$= — (h \ + \quad + \quad) \tag{5}$$

$$= — \tag{6}$$

$$= \frac{}{\sqrt{}} \tag{7}$$

Dengan mensubtitusi persamaan (6) ke dalam persamaan (5), didapatkan;

$$= \quad (h \ + \quad + \quad) \tag{8}$$

$$= \frac{}{(\qquad\qquad)} \tag{9}$$

3. Indeks 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. Bidang tersebut biasa diberi lambang (*hkl*) atau biasa disebut indeks miller. Indeks miller adalah kebalikan dari perpotongan suatu bidang dengan ketiga sumbu, dinyatakan dalam bilangan utuh bukan pecahan atau kelipatan bersama. Indeks miller (*hkl*) dapat digunakan untuk menggambarkan semua bidang dalam kristal. Langkah-langkah penentuan indeks bidang :

a. Menentukan titik potong bidang dengan sumbu koordinat sel satuan, misalnya (x_1, y_1, z_1).
b. Membandingkan hasil titik potong dengan tetapan kisi pada masing-masing sumbu, yaitu: x_1/a, y_1/b, z_1/c.
c. Mengambil kebalikannya: a/x_1, b/y_1, c/z_1.
d. Mendefinisikan: $h = a/x_1$, $k = b/y_1$, $l = c/z_1$ dan menyederhanakan perbandingan *h, k, l*.

4. Faktor Struktur Kristal

Faktor struktur (*F*) adalah pengaruh dari struktur kristal pada intensitas berkas yang didifraksikan. Besarnya faktor struktur (*F*) adalah:

$$= \sum \quad (\qquad) \tag{10}$$

a. Berdasarkan persamaan (10), diperoleh kasus sederhana bahwa sel satuan hanya berisi satu atom dan mempunyai fraksi koordinat 0 0 0, sehingga faktor strukturnya adalah:

$$= \quad ( ) = \tag{11}$$

dan

$=$

b. Pusat dasar sel mempunyai dua atom pada beberapa macam per unit sel *cubic*, yang berlokasi pada 0 0 0 dan ½ ½ 0.

$= \quad ( ) + \quad - -$

$= \quad (1 + \quad (\quad))$ (12)

Pernyataan ini dapat dievaluasi tanpa perkalian dengan konjugat kompleks, (h+k) selalu integral 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.

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

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 bcc (*body center cubic*) mempunyai dua atom yang berjenis sama, berlokasi pada 0 0 0 dan ½ ½ ½ .

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

$$= f\,[1 + e^{\pi i(h+k+l)}] \qquad (13)$$

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

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

d. Faktor struktur pada fcc (*face center cubic*), diasumsikan untuk mengisi 4 atom pada lokasi 0 0 0, ½ ½ 0, ½ 0 ½, dan 0 ½ ½ .

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

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

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 $F = f\,(1\text{-}1+1\text{-}1) = 0$, 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 $x_2 = y_2 = z_2 = ½$, maka faktor struktur pada kisi ini adalah:

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

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

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

Jika beda fase gelombang terpantul oleh bidang adalah π, maka amplitudo terpantul dari dua bidang terpasang adalah: $A + Ae^{(-i\pi)} = A - A = 0$ (Edi Istiyono, 2000). Posisi atom pada kristal dengan struktur kisi pusat badan (*I*) adalah (xj, yj, zj) dan (½ + *x*, ½ + *y*, ½ + *z*). Faktor struktur dinyatakan oleh persamaan:

$$F_{hkl} = \sum_{j=i}^{N/2} f_j\{\exp 2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j) + exp2\pi i(hx_j + ky_j + lz_j).exp\pi i(h + k + l)\}$$

$$= \sum f_j \exp 2\pi i\,(hx_j + ky_j + lz_j)[1 + exp(\pi i\{h + k + l\})] \qquad (16)$$

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

e. *Hexagonal close-packed* (*hcp*) mempunyai dua atom yang berlokasi pada 0 0 0 dan $\frac{2}{3}\ \frac{1}{3}\ \frac{1}{2}$.

$$= \quad (\ ) + \quad - - -$$

$$= \quad 1 + \quad - -$$

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

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 (Ariswan, 2005 : 7-9).

a. Faktor struktur pada kristal sc

$$= \sum \quad 2 \quad (h \quad + \quad + \quad) \tag{17}$$

Intensitas selalu muncul pada sembarang nilai *hkl.*

b. Faktor struktur pada kristal bcc

$$= \sum \quad \{\exp[- \quad (h + \quad + \ )] + 1\} \tag{18}$$

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 fcc

$$= \sum \quad 1 + \exp \; - \quad (h + \;) \; + \exp \; - \quad (h + \;) \; +$$

$$\exp \; - \quad (\; + \;) \tag{19}$$

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

$$= \; \{1 + \exp[- \quad (h + \quad + 2 \;)]\} \tag{20}$$

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

5. Ketidaksempurnaan pada Kristal

Berdasarkan struktur kristal, atom dalam setiap butir material tersusun secara teratur, tetapi terdapat berbagai ketidaksempurnaan kristal atau cacat kristal. Cacat pada kristal memiliki berbagai bentuk antara lain: cacat titik, cacat garis, cacat planar, dan cacat volume (Arthur Beiser, 1992: 357-361).

Cacat titik terjadi karena penyimpangan susunan periodik kisi terbatas sekitar beberapa atom sehingga terjadi kekosongan atom (*vacancy*), sisipan (*interstisi*), dan perpindahan kedudukan atom tak murni di sela kisi (*anti site*). Penyimpangan susunan periodik kisi di sekitar 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 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. Sisipan terjadi jika

terdapat atom tambahan dalam struktur kristal, sedangkan untuk *anti site* terjadi jika pemindahan ion dari kisi ke tempat sisipan.

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.

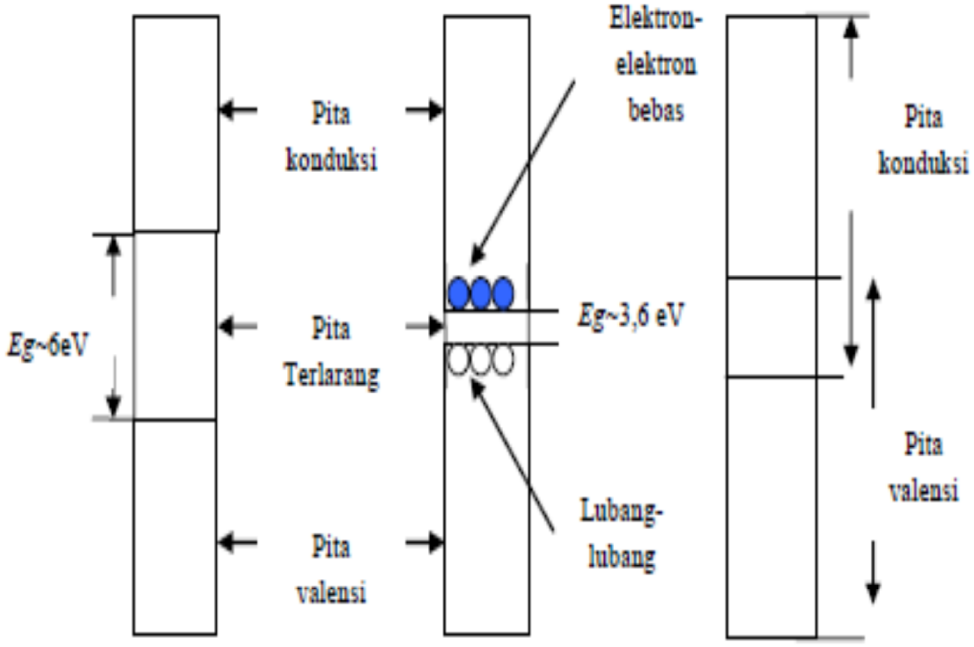
Dalam cacat *planar* terdapat batas butir, yaitu batas sudut kecil secara memadai dapat digambarkan sebagai dinding vertikal terdiri dari dislokasi. Rotasi suatu kristal relatif terhadap kristal lainnya seperti batas puntir, dihasilkan oleh jaringan silang yang terdiri dari dua sel dislokasi ulir. Batas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

Cacat volume terjadi akibat pemanasan, *iradiasi*, deformasi sehingga terbentuk *void,* gelembung gas dan rongga dalam kristal dimana sebagian berasal dari energi permukaan (1-3 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 plastisitas 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.

B. Semikonduktor

Berdasarkan kemampuan menghantarkan arus listrik, suatu bahan dibedakan menjadi 3 (tiga) macam, yakni konduktor, isolator, dan semikonduktor. Untuk konduktor pita valensi dan pita konduksi saling bertumpangan. Untuk semikonduktor dan isolator, pita konduksi dan pita valensi 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 4.



Gambar 4. Struktur pita energi pada isolator, semikonduktor, dan konduktor. (Ariswan, 2010: 3)

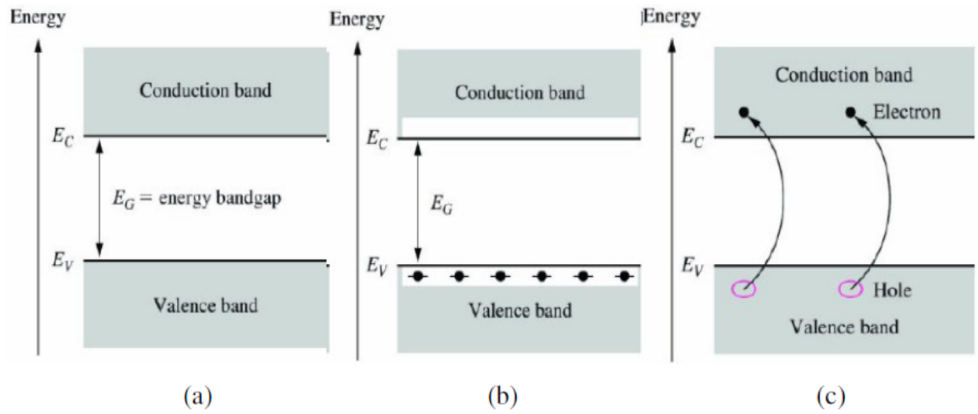
Konduktor merupakan bahan yang memiliki resistansi listrik kecil yaitu 10^{-5} Ωcm. Hal ini disebabkan dalam bahan konduktor terdapat sejumlah besar elektron bebas. Dalam tinjauan pita energi, konduktor memiliki pita konduksi dan pita valensi yang saling tindih (*overlap*) dan energi gap yang sangat 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.

Isolator adalah bahan yang tidak memungkinkan arus listrik melewatinya atau suatu penghantar listrik yang buruk, memiliki harga resistivitas antara (10^{14} – 10^{22}) Ωcm. 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 yaitu: (1) mempunyai celah energi yang cukup besar antara pita valensi dan (2) 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*, *karbon*, dan *selenium*. Semikonduktor mempunyai struktur pita energi yang sama dengan isolator, hanya saja celah energi terlarang atau *energi gap* (*Eg*) 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 *Eg* 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 *Eg*-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.



Gambar 5. Struktur pita energi pada semikonduktor (Ariswan, 2010: 3).

Berdasarkan Gambar 5(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 pebentukan ikatan kovalen antara atom-atom penyusun kristal semikonduktor. Sedangkan Gambar 5(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 5(c) diilustrasikan keadaan elektron konduksi dimana setelah terjadinya pemutusan ikatan kovalen, elektron valensi pada tingkat energi E_v akan berpinda 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.

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

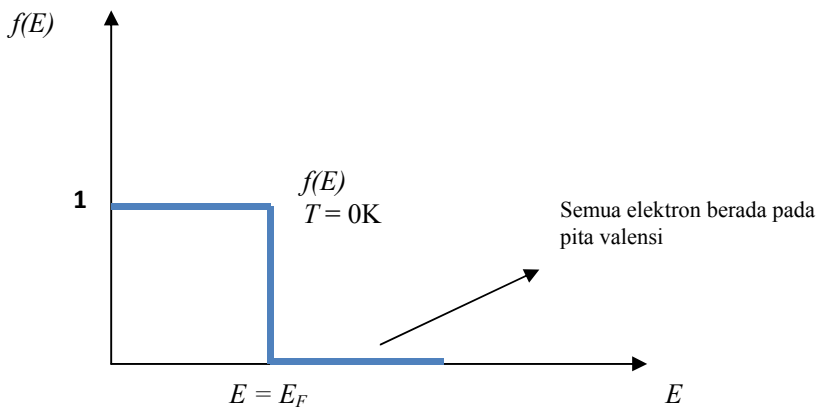
$$(\ ) = \frac{}{(\text{——})} \qquad (21)$$

a. Pada $T = 0$ K

$$(\ ) = \frac{}{(\text{——})}$$

Untuk $E < E_F$ maka $f(E) = 1$

Untuk $E > E_F$ maka $f(E) = 0$



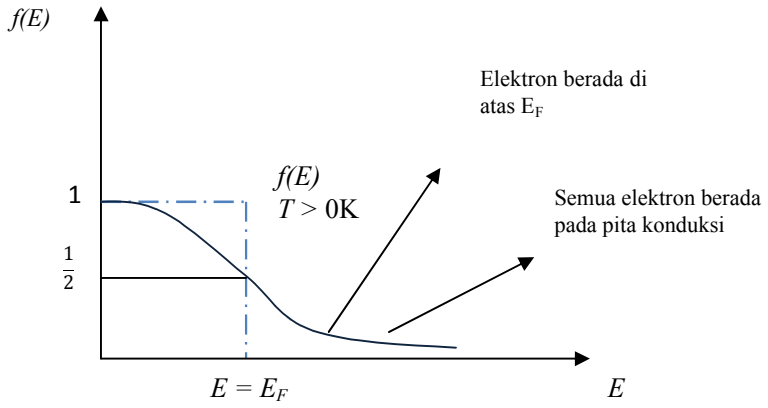
Gambar 6. Grafik distribusi Fermi-Dirac pada $T = 0$ K (Ariswan, 2008).

b. Pada $T > 0$ K

Untuk $E < E_F$ maka $(\ ) = \frac{}{(\text{——})}$

Untuk $E = E_F$ maka $(\ ) = \frac{}{(\ )} = -$

Untuk $E > E_F$ maka $(\ ) = \frac{}{(\text{——})}$



Gambar 7. Grafik distribusi Fermi-Dirac pada $T > 0$ K (Ariswan, 2008).

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

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

$$= \quad = \tag{22}$$

dengan n_i disebut konsentrasi atau rapat intrinsik.

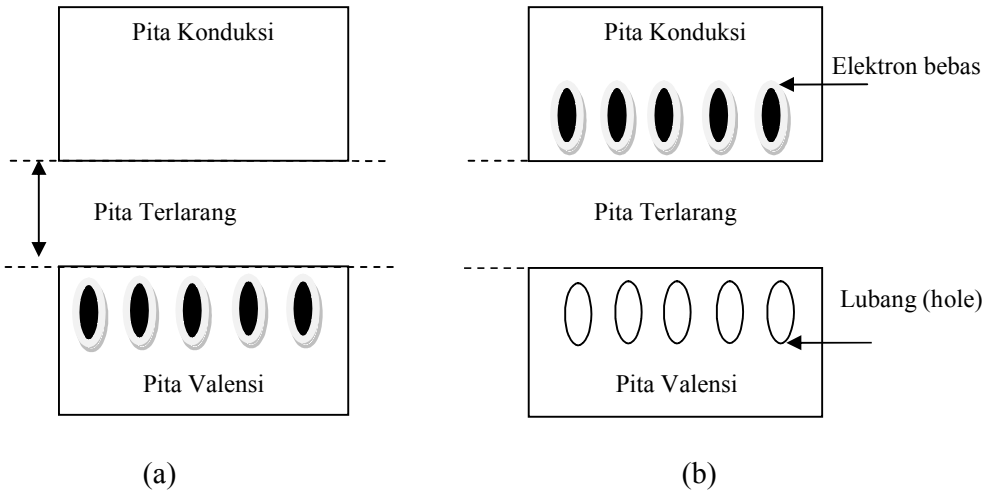
Energi fermi (E_f) pada semikonduktor intrinsik terletak antara pita konduksi dan pita valensi yang besarnya adalah :

$$= \frac{\quad}{\quad} \tag{23}$$

dengan adalah energi pada pita konduksi, dan 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 10^9 atom yang memberikan sumbangan terhadap hantaran listrik. (Nyoman Suwitra, 1989: 222-227).



Gambar 8. Keadaan pita energi semikonduktor intrinsik.
(a) Pada suhu 0 K dan (b) Diatas suhu 0 K (Thomas Sri Widodo, 2002).

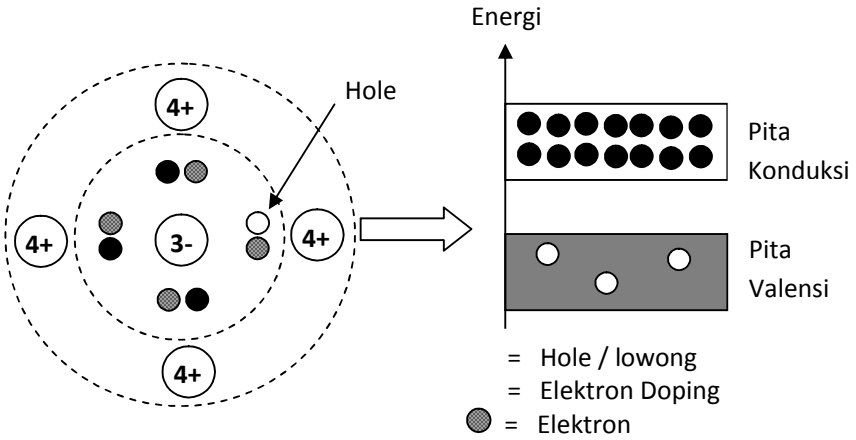
2. Semikonduktor ekstrinsik

Semikonduktor ekstrinsik terbentuk akibat ketakmurnian (pengotor) yaitu dengan cara memasukkan elektron atau *hole* yang berlebih. 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 menjadi 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 negatif pada kristal yang netral. Karena atom pengotor (*dopan*) menerima elektron dari pita valensi, maka atom pengotor ini disebut sebagai atom aseptor (*acceptor*). Semikonduktor yang di*doping* 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. Di dalam semikonduktor tipe-p akan

terbentuk tingkat energi yang diperbolehkan yang letaknya sedikit di atas pita valensi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 9. Oleh karena energi yang dibutuhkan elekton 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 IIIB (B, Al, Ga, dan In) pada unsur-unsur golongan IV menghasilkan semikonduktor tipe-p.



Gambar 9. 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

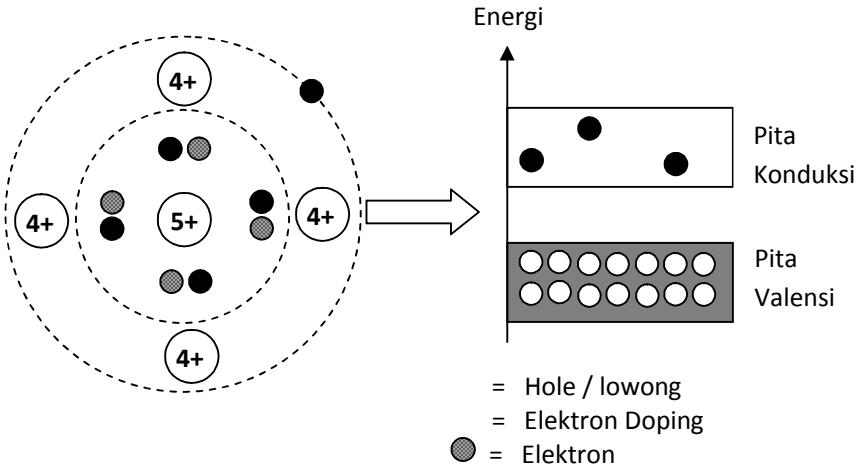
yang tidak berpasangan (Gambar 10). Dengan adanya energi thermal yang kecil saja, sisa elektron ini akan menjadi elektron bebas dan siap menjadi pembawa muatan dalam proses hantaran listrik. Material yang dihasilkan dari proses pengotoran ini disebut semikonduktor tipe-n karena menghasilkan pembawa muatan 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 aras donor dan elektron pengotor disebut donor karena elektron dengan mudah diberikan ke pita konduksi.

Suatu semikonduktor yang telah di*doping* 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.



Gambar 10. Tingkat energi semikonduktor tipe-n (Ariswan, 2008).

Mekanisme mengalirnya arus listrik pada semikonduktor disebabkan adanya arus hanyut (*drift*) dan arus difusi. Arus hanyut 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 bermuatan $-q$ dan *hole* bermuatan $+q$ adalah :

$$= - \quad (24)$$

$$= \quad (25)$$

dengan dan adalah laju hanyut pada elektron dan *hole* (cm/s), dan adalah mobilitas dari elektron dan *hole* (cm^2/V.m). Tanda negatif pada persamaan 2. 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 :

$$= (- \ ) \quad = \quad (26)$$

$$= (+ \ ) \quad = \quad (27)$$

dengan *J* adalah rapat arus (A/m^3), adalah pembawa muatan (m^3/volt.s), *n* adalah konsentrasi elektron, *p* adalah konsentrasi *hole*.

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 hukum difusi sebagai berikut :

$$= - \quad \quad (28)$$

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

$$= \quad \quad (29)$$

$$= - \quad — \tag{30}$$

dengan dan adalah rapat arus (A/m^2), dan adalah konsentrasi pembawa muatan (m^2/volt.s), dan adalah koefisien difusi, *x* adalah posisi (m).

dengan demikian rapat arus total pada semikonduktor merupakan hasil penjumlahan dari arus hanyut dan arus difusi,

$$= \quad + \quad — \tag{31}$$

$$= \quad - \quad — \tag{32}$$

C. Bahan Semikonduktor Pb(SeTe)

1. PbSe (*Plumbum Sellenoida*)

Plumbum Sellenoida merupakan bahan paduan dua unsur yaitu *Plumbum* (Pb) dan *Sellenium* (Se). *Plumbum* merupakan logam kebiruan (*bluish white*), termasuk golongan IV pada tabel berkala mempunyai nomor atom 82; massa atom relatif (Ar) 207,2 gram/mol; titik lebur 327,5 ^oC; titik didih 1749 ^oC, dan struktur kristalnya adalah kubik pusat muka fcc (*face center cubic*). Semikonduktor berbahan dasar Pb sangat potensial untuk digunakan sebagai aplikasi detektor inframerah, semikonduktor laser, dan sebagai bahan dasar pelindung peralatan kedokteran dan laboratorium yang menggunakan radiasi sinar-x. (Arthur Beiser, 1992: 249).

Sellenium merupakan logam berwarna kelabu dalam bentuk pelet, termasuk golongan VI pada tabel berkala, mempunyai nomor atom 34, massa

atom relatif (Ar) 78,96 gram/ mol, titik lebur 217 ^{o}C, titik didih 684,9 ^{o}C, dan struktur kristalnya adalah *hexagonal* (Arthur Beiser, 1992: 249).

2. PbTe (*Plumbum Telluride*)

Plumbum Telluride merupakan bahan paduan antara dua unsur yaitu *Plumbum* dan *Tellurium*. Menurut data JCPDS, PbTe adalah kristal berstruktur kubik mempunyai harga parameter kisi a = b = c dan $\alpha = \beta = \gamma = 90^0$. *Plumbum* merupakan logam kebiruan (*bluish white*), termasuk golongan IV pada tabel berkala mempunyai nomor atom 82, massa atom relatif (Ar) 207,2 gram/mol, titik lebur 327,5 ^{o}C, titik didih 1749 ^{o}C, dan struktur kristalnya adalah fcc (*face center cubic*) (Arthur Beiser, 1992: 249).

Tellurium merupakan logam yang berbentuk pellet berwarna putih-perak dengan diameter antara 1 mm – 3 mm, termasuk golongan VI pada tabel berkala mempunyai nomor atom 52; massa atom relatif (Ar) 127,6 gram/mol; titik lebur 449,51 ^{o}C; titik didih 988 ^{o}C; dan struktur kristalnya adalah *hexagonal* (Arthur Beiser, 1992: 249).

D. Aplikasi Semikonduktor PbSeTe

Energi gap yang relatif kecil dari paduan unsur golongan IV-VI seperti PbSeTe, PbSnTe berhasil dimanfaatkan pada awal 1970-an untuk membuat susunan detektor inframerah sebagai pendeteksi radiasi termal. Paduan unsur golongan IV-VI ini, memiliki kemampuan untuk menangkap radiasi inframerah dari jarak <3 μm sampai >30 μm (Mukherjee *et al,* 2010). Detektor inframerah adalah detektor yang bereaksi terhadap radiasi

inframerah. Inframerah adalah radiasi elektromagnetik dari panjang gelombang yang lebih panjang dari cahaya tampak, tetapi lebih pendek dari radiasi gelombang radio yaitu antara 700 nm – 1 mm. karakter dari inframerah adalah sebagai berikut :

1. Tidak dapat dilihat oleh manusia.
2. Tidak dapat menembus materi yang tidak tembus pandang.
3. Dapat ditimbulkan oleh komponen yang menghasilkan panas.

Berdasarkan panjang gelombangnya, inframerah dapat dibedakan menjadi tiga daerah, antara lain :

1. *Near Infrared* dengan panjang gelombang (0,75 – 1,5) .
2. *Mid Infrared* dengan panjang gelombang (1,5 – 10) .
3. *Far Infrared* dengan panjang gelombang (10 – 100) .

Prinsip kerja dari detektor inframerah adalah apabila inframerah (*IR*) ditembakkan ke suatu media material, maka sebagian sinar tersebut mungkin akan diserap (*absorb*) oleh media tersebut. Frekuensi *IR* yang diserap adalah unik untuk setiap senyawa maupun molekul. Sedangkan intensitas *IR* yang diserap bergantung pada jumlah kuantitas material tersebut. Jadi dengan mengetahui frekuensi dan intensitas *IR* yang diserap oleh suatu media atau sampel, kita dapat mengetahui jenis dan kuantitas suatu senyawa maupun molekul yang ada di dalam media atau sampel tersebut. Fenomena inilah yang mendasari cara kerja alat ukur yang menggunakan sinar inframerah.

Pengukuran intensitas *IR* diperlukan suatu peralatan yang disebut detektor inframerah. Ada beberapa detektor inframerah yang ada saat ini,

yang dikelompokkan menjadi dua tipe yaitu *thermal* dan *photonic*. Sinar *IR* mengandung energi panas, sehingga apabila ditembakkan ke suatu material maka temperatur material tersebut akan meningkat. Semakin besar intensitas *IR*, semakin besar energi panas yang dikandungnya. Dengan mengetahui besarnya kenaikan temperatur material yang dikenai *IR* tersebut, kita dapat mengetahui intensitas *IR* yang mengenainya. Jadi ada relasi antara kenaikan temperatur sebuah material dengan intensitas *IR* yang mengena material tersebut. *Thermal detector* memanfaatkan relasi ini. cara kerja *thermal detector* adalah dengan memanfaatkan beberapa sifat material yang bergantung pada temperatur. Ada beberapa jenis *IR thermal detector*, antara lain :

1. *Bolometer* dan *Microbolometer,* yang didasarkan pada perubahan resistansi material terhadap perubaha temperatur.
2. *Thermocouple* dan *Thermopoles*, yang didasarkan pada efek *thermoelectric*.
3. *Golay cells*, yang didasarkan pada *thermal expansion*.
4. *Pyroelectric*, yang didasarkan pada sifat material yang mampu membangkitkan beda potensial listrik antara kedua sisinya jika dipanaskan. *Pyroelectric* biasanya digunakan dalam *spectrometer*.

Photonic detector memanfaatkan sifat terjadinya eksitasi elektron apabila ditembaki *photon* (sinar *IR*). Semakin besar intensitas sinar *IR* yang diserap, semakin banyak eksitasi elektron yang terjadi. Ada beberapa jenis *IR photonic detector,* antara lain :

1. *Photoconductive*, yang memanfaatkan sifat material yang menjadi lebih konduktif jika disinari gelombang *IR*. Eksitasi elektron menyebabkan elektron bebas (*hole*) menjadi lebih banyak sehingga lebih konduktif.
2. *Photovoltaic*, eksitasi elektron dimanfaatkan sebagai sumber arus.
3. *Photodiode*, eksitasi elektron dimanfaatkan sebagai sumber arus atau sumber tegangan. http://asro.wordpress.com/2008/06/24/infrered-detector/

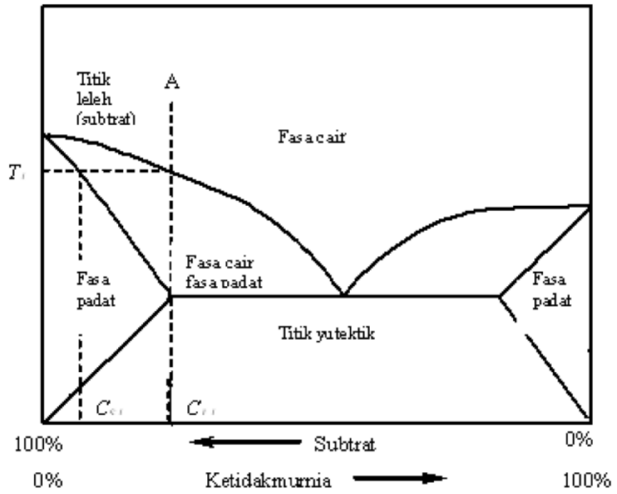
E. Metode Bridgman

Penumbuhan kristal terjadi dari penambahan sejumlah atom, ion, atau rangkaian polimer yang baru ke dalam susunan yang telah mempunyai karakteristik dari ion atau atom dalam suatu kristal. Untuk mendapatkan semikonduktor berkualitas tinggi, diperlukan kemurnian yang tinggi dan kesempurnaan kristal tunggal yang akan dijadikan sebagai bahan dasar piranti tersebut. Karena pada umumnya, pada kristal semikonduktor penambahan sedikit ketakmurnian mempengaruhi pembawa muatan yang mempunyai pengaruh besar pada karakteristik komponen yang dibuat (Reka Rio, 1982: 151).

Metode penumbuhan kristal diklasifikasikan menjadi tiga macam, yaitu: penumbuhan dari pelelehan, penumbuhan dari larutan, dan penumbuhan dari fase uap. Penumbuhan dari pelelehan dapat dilakukan dengan berbagai metode. Salah satunya adalah metode Bridgman. Penumbuhan kristal menggunakan metode ini dilakukan dengan cara melelehkan bahan yang telah dimurnikan di dalam tabung yang telah

divakumkan. Hal ini dilakukan karena pemurnian bahan sangat mempengaruhi hasil karakteristik kristal yang terbentuk. Bahan-bahan yang telah dimurnikan kemudian dimasukkan dan dilelehkan dalam alat yang disebut *furnace*.

Pada temperatur tinggi, kristal dapat tumbuh dan terbentuk dengan cepat. Namun, kristal tersebut rawan terhadap cacat kristal. Untuk itu bahan campuran yang akan ditumbuhkan perlu diperhatikan dengan melihat diagram *fasa* yang menyatakan keadaan seimbang suatu sistem. Dengan diagram *fasa* kita dapat mengetahui suhu kritis suatu bahan. *Fasa* adalah bagian sistem yang komposisi sifat-sifat fisiknya seragam yang terpisah dari sistem lainnya oleh adanya bidang batas.



Gambar 11. Diagram fasa (Reka Rio, 1982: 152)

Gambar 11, menunjukkan diagram *fasa* yang menggambarkan berbagai tingkatan apabila ketidakmurnian ditambahkan ke dalam semikonduktor. Seperti terlihat pada gambar, dengan penurunan temperatur,

cairan dengan komposisi C_{L1} (titik A) menyilang garis *fasa* cair pada temperatur T_1. Dari titik itu dimulai pemadatan. Komposisi *fasa* padat yang dihasilkan adalah C_{S1} dan bahan dengan komposisi C_{L1} tidak memadat. Bila jumlah cairan dengan komposisi C_{S1} sangat besar, kemurnian dari bahan yang memadat pada temperatur T_1 adalah $C_{S1,}$ dengan ketidakmurnian yang lebih rendah dari pada C_{L1} (Reka Rio, 1982: 152).

Prinsip dasar metode Bridgman adalah pemanasan bahan dasar dengan kemurnian tinggi 99,99% menggunakan tabung *pyrex* yang telah divakumkan dan dipanaskan ke dalam *furnace* dalam bentuk kapsul *pyrex* dengan massa masing-masing bahan yang sesuai dengan material yang akan dibuat. Setelah mendapatkan hasil dari proses penumbuhan kristal tersebut dalam bentuk *massif* atau *ingot*, selanjutnya dilakukan karakterisasi untuk menyatakan kualitas hasil penumbuhan kristal tersebut.

F. 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).

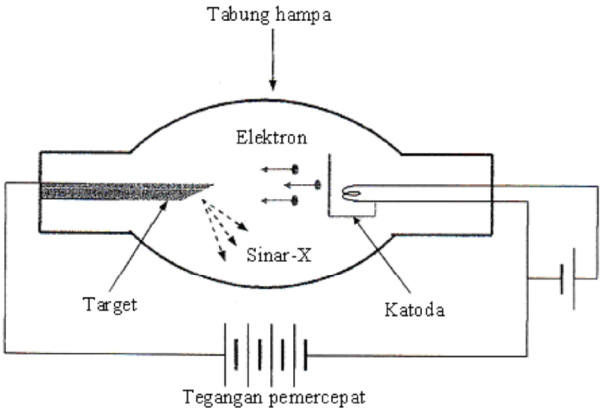
1. **Analisis *X-Ray Diffraction* (XRD)**

Teknik *X-Ray Diffraction* (XRD) berperan penting dalam proses analisis padatan kristal maupun amorf. XRD adalah metode karakterisasi lapisan yang digunakan untuk mengetahui senyawa kristal yang terbentuk. 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 Å – 2,5 Å dan memiliki energi foton antara 1,2 x 10^3 eV – 2,4 x 10^5 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 *bremstrahlung*.



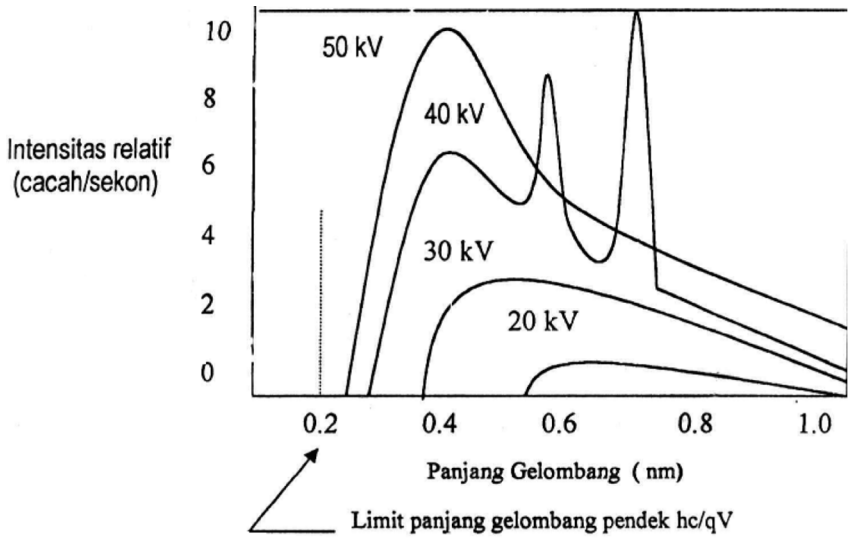
Gambar 12. Diagram sinar X (Arthur Beiser, 1992: 62)

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 kontinyu dengan rentang panjang gelombang yang lebar dan spektrum diskrit sesuai karakterisasi logam yang ditembak. 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 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 :

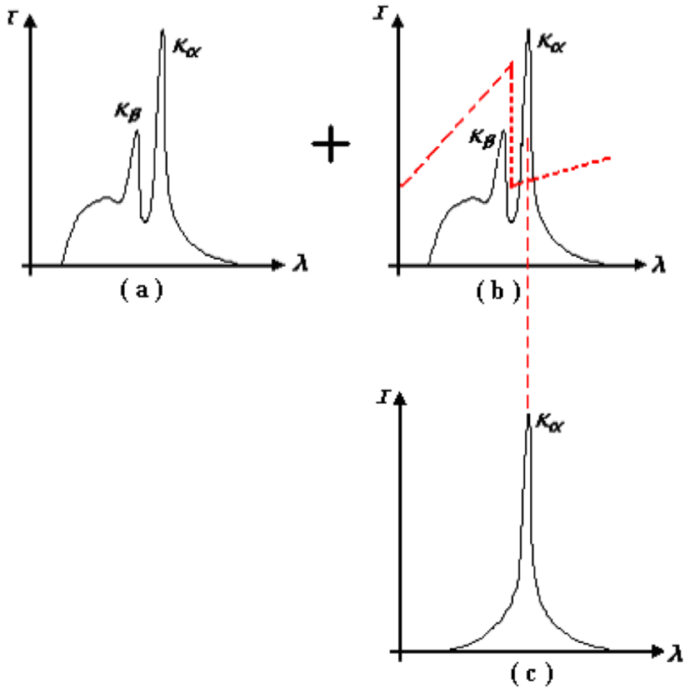
$$h - = \quad - \tag{33}$$

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



Gambar 13. Spektrum radiasi sinar-x kontinu dan diskret
(Arthur Beiser, 1992: 62)

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 energi 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.



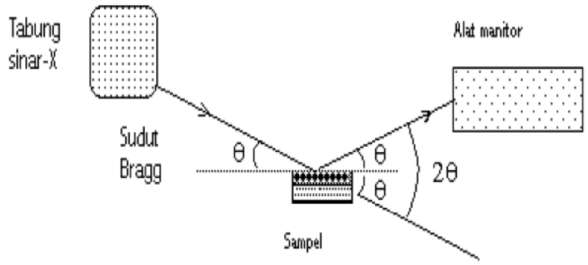
Gambar 14. Sinar-x karakteristik (Smallman, 1999: 153)

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.

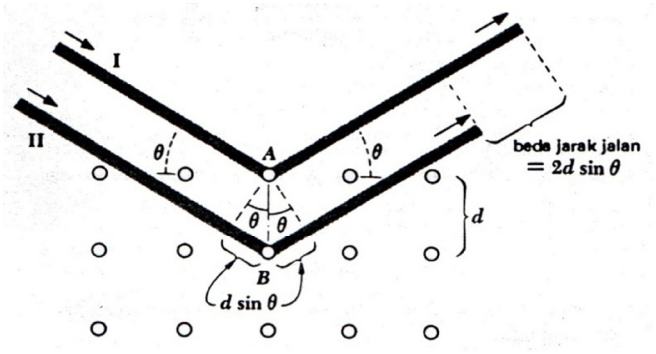
Yaitu dengan memilih bahan yang mempunyai nomor atom lebih kecil dari atom target yang merupakan sumber sinar-x. Gambar 14 (c) sinar-x monokromatik setelah melalui penyaringan.

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-arah tertentu gelombang hambur 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 sebagainya (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 dan difraktogram.



Gambar 15. Skema Difraktometer (Asmuni, tth:3).



Gambar 16. Diffraksi Bragg. (Arthur Beiser, 1992: 68)

Gambar 16, 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 dan sudut θ. Agar mengalami interferensi konstruktif, kedua berkas tersebut harus memiliki beda jarak $n\lambda$. Sedangkan beda jarak lintasan kedua berkas adalah $2d \sin \theta$. Persamaan ini dikenal dengan hukum Bragg. Pemantulan Bragg dapat terjadi jika ≤ 2 , 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 kubik (a = b = c, α = β = γ = 90°) memiliki konstanta kisi *a*, sudut-sudut berkas yang didifraksikan dari bidang-bidang kristal (*hkl*) dapat dihitung dengan rumus jarak antar bidang sebagai berikut :

$$\frac{\quad}{\quad} = \left[\frac{(\qquad)}{\qquad}\right] \tag{33}$$

Dengan memasukkan persamaan Bragg (1), didapatkan persamaan:

$$\frac{\quad}{\quad} = \left(\frac{\quad}{\quad}\right) \tag{34}$$

$$\sin \quad = \frac{\quad}{\quad}[(h \; + \; {}^{2} + \;)] \tag{35}$$

$$= \frac{\quad}{\quad} \; \overline{\left(\frac{\quad}{\quad}\right)} \tag{36}$$

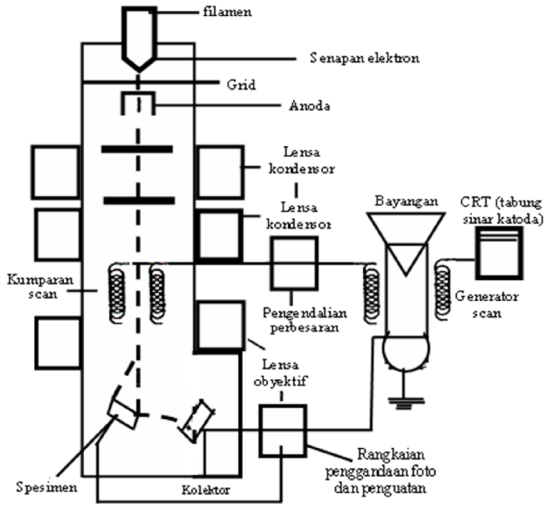
Penentuan orientasi kristal dilakukan dengan mengamati pola berkas difraksi sinar-x yang dipantulkan oleh kristal. Untuk XRD, pola difraksi diamati sebagai fungsi sudut *2θ*. Pola difraksi yang terjadi kemudian dibandingkan dengan JCPDS sebagai data standar.

2. 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 17. 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*).



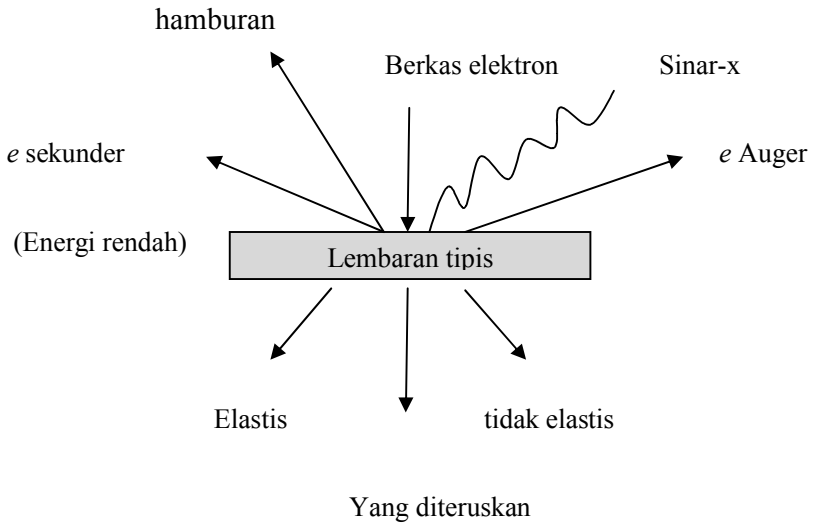
Gambar 17. Skema dasar SEM. (Smallman, 2000: 157)

3. 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 18. Hamburan dari elektron yang jatuh pada lembaran tipis (Smallman, 2000 : 155).

Gambar 18 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 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 kuantitatif. Hal ini karena masing-masing unsur menyebar pada panjang gelombang spesifik. Jika teknik SEM dan EDAX digabungkan maka keduanya dapat dimanfaatkan unyuk mengidentifikasi unsur-unsur yang terlihat pada struktur mikro (Prafit Wiyantoko, 2009 :34).

G. **Kerangka Berfikir**

Karakteristik bahan semikonduktor $Pb(Se_{0,8}Te_{0,2})$ dipengaruhi oleh berbagai hal diantaranya waktu preparasi, temperatur saat pemanasan serta metode yang digunakan untuk preparasi bahan. Preparasi bahan semikonduktor $Pb(Se_{0,8}Te_{0,2})$ ini menggunakan metode Bridgman, metode ini bertujuan untuk mendapatkan material semikonduktor yang mempunyai kristalinitas dan kemurnian yang tinggi sehingga dapat diaplikasikan sebagai bahan dasar pembuatan alat elektronika maupun optoelektronika.

Temperatur pemanasan pada saat preparasi penumbuhan kristal akan mempengaruhi tingkat kristalinitas $Pb(Se_{0,8}Te_{0,2})$ yang berhubungan dengan struktur kristal dan sifat optik. Dengan perubahan temperatur diharapkan dapat memberikan informasi tentang karakteristik bahan semikonduktor $Pb(Se_{0,8}Te_{0,2})$. Informasi tersebut dideteksi dengan melakukan karakterisasi XRD yang dilakukan di Universitas Gadjah Mada, karakterisasi SEM dan EDAX yang dilakukan di Institut Teknologi Bandung.