PENDAHULUAN

Di dalam modul ini Anda akan mempelajari Teori Pita Energi yang mencakup : asal mula celah energi, model elektron hampir bebas, model Kronig-Penney, dan persamaan sentral. Oleh karena itu, sebelum mempelajari modul ini Anda terlebih dahulu harus mempelajari modul nomor 4 dari matakuliah Fisika zat padat.Materi kuliah dalam modul ini merupakan pengayaan dari materi dalam matakuliah Fisika Dasar.

Pengetahuan yang akan Anda peroleh dari modul ini akan barmanfaat untuk memperdalam pengetahuan anda tetang teori pita energi yang biasa Anda pelajari di SMU dan dalam Fisika Dasar.

Setelah mempelajari modul ini Anda diharapakan dapat mencapai beberapa tujuan instruksional khusus, sebagai berikut:

Anda harus dapat

1. menjelaskan asal mula celah energi.
2. menggunakan persamaan sentral untuk menentukan nilai celah energi.
3. menjelaskan arti lebar pita energi.
4. menjelaskan mengapa lebar setiap pita energi selalu sama.
5. menjelaskan pita energi untuk isolator, semikonduktor, dan konduktor.

Materi kuliah dalam modul ini akan disajikan dalam urutan sebagai berikut:

1. KB. 1 Asal mula celah energi. Di dalam KB. 1 ini Anda akan mempelajari sub-pokok bahasan : model elektron hampir bebas, dan teorema Bloch.
2. KB. 2 Nilai celah energi. Dalam KB. 2 ini Anda akan mempelajari sub-pokok bahasan: model Kronig-Penney dan persamaan sentral. Agar Anda dapat mempelajari modul ini dengan baik, ikutilah petunjuk belajar

berikut ini.

1. Bacalah tujuan instruksional khusus untuk modul ini.
2. Baca dan pelajari dengan seksama uraian setiap kegiatan belajar.
3. Salinlah konsep dasar dan persamaan-persamaan penting ke dalam buku latihan Anda.

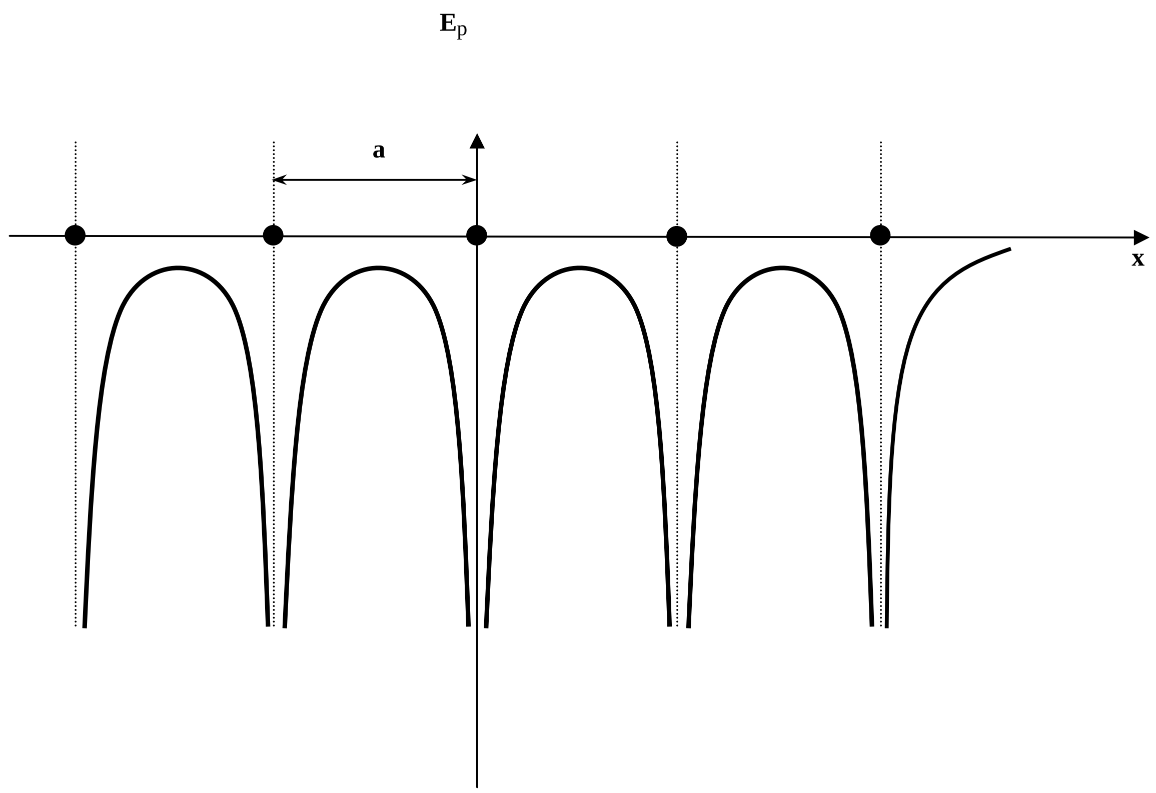
4. Perhatikan dan pelajari dengan baik contoh-contoh soal/masalah dalam setiap kegiatan belajar.
5. Kerjakan semua soal latihan dan usahakan tanpa melihat kunci jawaban terlebih dahulu.

KB 1. Asal Mula Energi Celah

Teori elektron bebas yang dijelaskan dalam modul nomor 4 Fisika Zat Padat telah berhasil menjelaskan berbagai macam sifat-sifat termal (panas) suatu logam. Tetapi masih banyak sifat-sifat logam lainnya yang tidak dapat dijelaskan dengan menggunakan teori elektron bebas. Sebagai contoh mengapa beberapa logam dengan jumlah elektron bebas yang banyak dapat bersifat sebagai konduktor, sedangkan logam-logam dengan jumlah elektron konduksi sedikit akan bersifat sebagai isolator. Sifat-sifat logam seperti ini tidak dapat dijelaskan dengan menggunakan teori elektron bebas. Masih banyak hal lain yang berkaitan dengan sifat logam yang tidak dapat dijelaskan oleh teori tersebut, seperti misalnya perubahan resistivitas konduktor oleh adanya perubahan suhu, dan sifat-sifat semikonduktor.

Kegagalan teori elektron bebas dalam menjelaskan hal-hal tersebut di atas disebabkan oleh penyederhanaan yang berlebihan tentang elektron konduksi. Menurut teori elektron bebas, elektron konduksi (elektron valensi) dianggap mengalami energi potensial yang tetap atau bahkan tidak memiliki energi potensial dari inti atom dan elektron-elektron lainya di dalam atom. (Untuk tujuan penyederhanaan, *inti atom dan elektron-elektron lainya di dalam atom* akan kita sebut sebagai <u>*pusat atom atau badan atom*</u> yang merupakan terjemahan dari bahasa inggris "core"). Oleh karena itu, menurut teori elektron bebas, elektron konduksi ini bebas bergerak di dalam kristal dan hanya dibatasi oleh permukaan kristal itu sendiri. Tetapi kenyaataannya, energi potensial akibat badan atom itu tidaklah tetap, tetapi energi potensial itu merupakan fungsi posisi elektron. Artinya, nilai energi ini bergantung pada posisi elektron tersebut di dalam kristal diukur relatif terhadap inti atom. Di samping itu, energi potensial itu juga mungkin timbul akibat adanya elektron-elektron konduksi lainnya di dalam kristal itu. Jadi keadaan energi potensial yang sebenarnya di dalam kristal adalah sangat komplek. Oleh karena itu, kembali disini kita akan mencoba menggunakan pendekatan yang lebih baik dari pada pendekatan yang digunakan dalam teori elektron bebas. Pendekatan itu adalah bahwa badan atom atom itu dianggap diam dan energi potensial itu merupakan fungsi yang periodik dengan perioda sebesar konstanta kisi (a) kristal, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pendekatan ini atau asumsi ini didasarkan pada kenyataan bahwa atom-atom di dalam kristal disebarkan secara periodik pada setiap titik kisi. Di samping itu, asumsi ini menganggap bahwa energi potensial akibat elektron-elektron lainnya adalah konstan.

Gambar 1. Energi potensial (E_p) elektron sebegai fungsi posisi (x) dalam sebuah kristal satu dimensi yang periodik dengan perioda sama dengan konstanta kisi a. Kurva paling kanan menyatakan energi potensial di sekitar permukaan kristal.



Energi potensial yang periodik itu merupakan landasan dari teori pita energi dalam zat padat. Tingkah laku sebuah elektron di dalam potensial seperti itu dijelaskan dengan cara mengkonstruksi fungsi gelombang elektron dengan menggunakan pendekatan satu elektron. Dalam pendekatan ini, fungsi gelombang total untuk sistem diperoleh dari gabungan fungsi gelombang setiap elektron. Dengan kata lain, medan listrik yang dialami sebuah elektron tertentu dianggap sebagai resultan dari medan listrik inti dan medan listrik rata-rata elektron lainnya. Gerak elektron di dalam energi potensial listrik periodik ini menghasilkan hal-hal berikut:

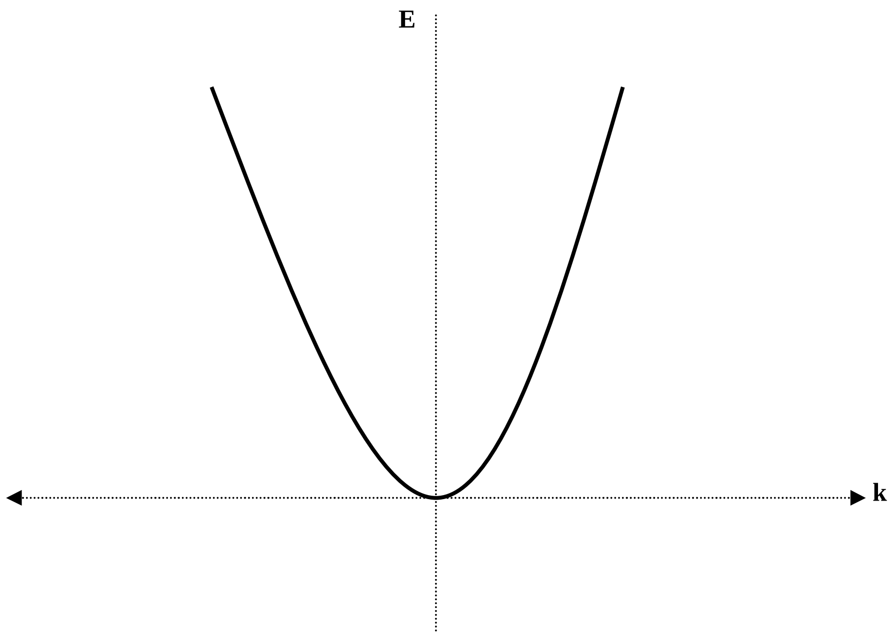
1. Pita-pita energi yang dipisahkan oleh energi celah.
2. Fungsi energi elektron E(k) adalah periodik (lihat Gambar 1)

Kedua hal ini tidak dapat diterangkan oleh model elektron bebas. Menurut teori elektron bebas, energi elektron adalah merupakan fungsi kuadratik dari vektor gelombang (k) dan tidak menunjukan adanya energi celah.

Nah sekarang marilah kita bahas secara fisik asal mula celah-celah energi. Untuk keperluan ini kita akan menggunakan kristal satu dimensi dengan konstanta kisi sebesar a. Menurut toeri elektron bebas (V = 0), energi elektron bebas adalah

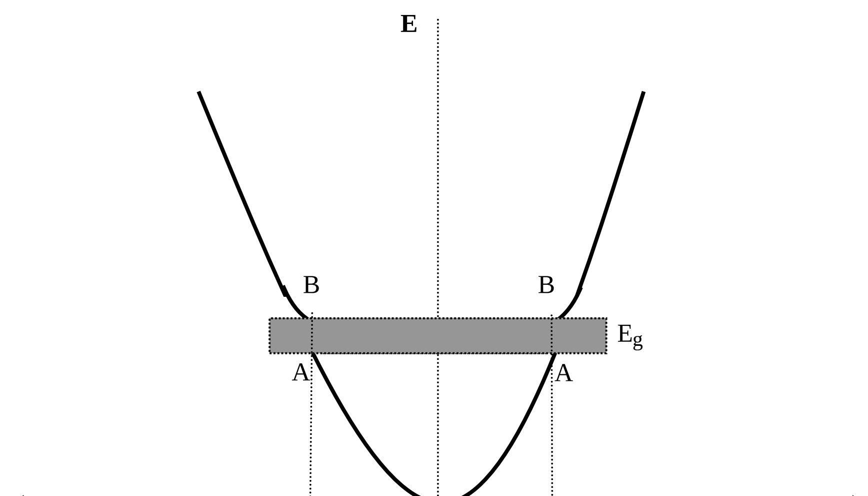
$$E = \hbar^2 k^2/2m. \qquad (1)$$

sehingga menurut teori ini, kurva E sebagai fungsi k adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Dalam Gambar 2 ini, nilai energi adalah kontinyus untuk semua nilai k. Artinya kita tidak menemukan adanya celah energi dimana elektron dilarang berada. Inilah kegagalan teori elektron bebas dalam menjelaskan perbedaan antara isolator, semikonduktor, dan konduktor. Oleh karena itu, agar kita dapat memahami perbedaan tersebut, kita menggunakan teori yang mirip dengan teori elektron bebas tetapi sedikit dimodifikasi, yaitu *teori elektron hampir bebas* atau sering disebut *model elektron hampir bebas*.



Gambar 2. Energi seabagi fungsi vektor gelombang k menurut model elektron bebas.

Menurut model elektron hampir bebas (V (x) ≠ 0) energi elektron tidak lagi kontinyus untuk semua nilai k, tetapi tepat pada nilai-nilai k tertentu, tingkat energi elektron mengalami diskontinyu, yaitu pada nilai-nilai k = $\pm$ n π/a, dimana n = 1, 2, 3, dan seterusnya. Dengan demikian, kurva energi (E) sebagai fungsi vektor gelombang (k) tidak lagi seperti kurva yang ditunjukkan dalam Gambar 2 di atas, tetapi seperti kurva yang ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Kurva energi (E) sebagai fungsi vektor gelombang (k) dalam sebuah kristal monoatomik satu dimensi dengan konstanta kristal sebesar *a*. Celah energi E_g yang ditunjukkan terjadi pada $k = \pm \pi/a$.

Dari modul Fisika Zat Padat terdahulu Anda sudah mengetahui bahwa syarat terjadinya difraksi Bragg adalah: (catatan: huruf yang dicetak tebal menyatakan besaran vektor)

$$(\mathbf{k} + \mathbf{G})^2 = k^2. \qquad (2)$$

Dalam satu dimensi, persamaan (2) menjadi

$$k^2 + 2\,\mathbf{k} \cdot \mathbf{G} + G^2 = k^2. \qquad (3)$$

Untuk kristal satu dimensi, **k** berimpit dengan **G**, sehingga $2\,\mathbf{k} \cdot \mathbf{G} = 2\,k \cdot G \cos 0 = 2\,k \cdot G$. Dengan demikian, persamaan (3) menjadi

$$k^2 + 2\,k \cdot G + G^2 = k^2$$ (semua besaran disini sekarang adalah skalar).

$$k = \pm \tfrac{1}{2} G \qquad (4)$$

dimana $G = n\,(2\pi/a)$ adalah vektor kisi resiprok dan n adalah bilangan bulat. Jadi, persamaan (4) dapat ditulis sebagai berikut:

$$k = \pm \tfrac{1}{2} G = \pm n\,\pi/a, \qquad (5)$$

Difraksi pertama terjadi dan celah energi pertama terjadi untuk nilai $k = \pm \pi/a$. Ingat bahwa daerah antara $-\pi/a$ dengan $+\pi/a$ disebut daerah *Brillouin pertama*. Celah energi-celah energi yang lainnya terjadi untuk nilai-nilai k yang merupakan kelipatan dari $\pm \pi/a$.

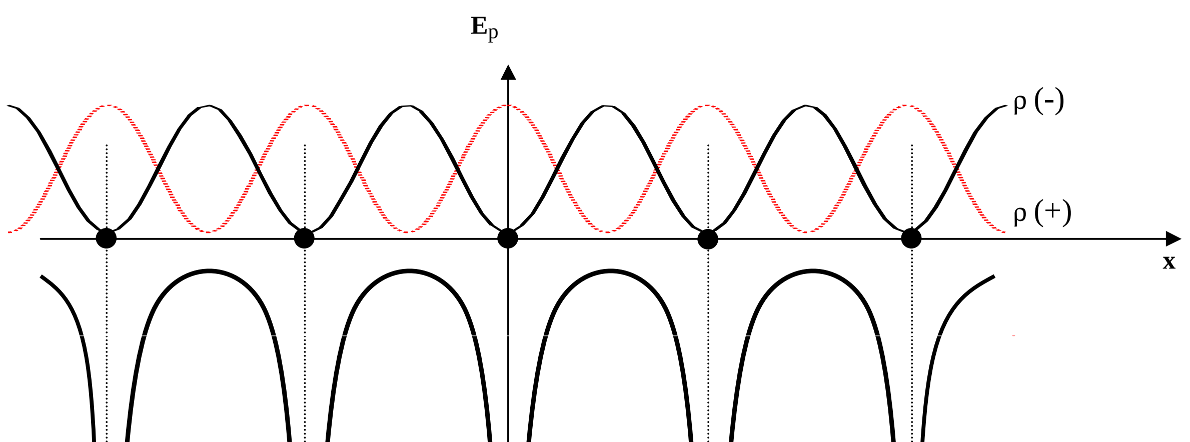
Fungsi gelombang di $k = \pm \pi/a$ bukan merupakan gelombang berjalan $e^{\pm i\pi x/a}$ dari elektron bebas, tetapi fungsi gelombang di titik $k = \pm \pi/a$ adalah merupakan gabungan antara gelombang yang berjalan ke kanan dan ke kiri. Dengan kata lain, fungsi gelombang di titik $k = \pm \pi/a$ merupakan fungsi gelombang hasil interferensi antara gelombang yang berjalan ke kanan dan ke kiri. Hal ini dapat terjadi jika syarat difraksi Bragg terpenuhi oleh fungsi gelombang k. Hasilnya, fungsi gelombang di titik $k = \pm \pi/a$ merupakan gelombang berdiri. Fungsi gelombang berdiri tersebut terdiri atas dua macam, yaitu fungsi gelombang yang saling menguatkan dan fungsi gelombang yang saling melemahkan. Secara matematik, kedua fungsi gelombang berdiri tersebut dapat dibentuk dari fungsi gelombang yang berjalan ke kanan dan ke kiri, yaitu sebagai berikut:

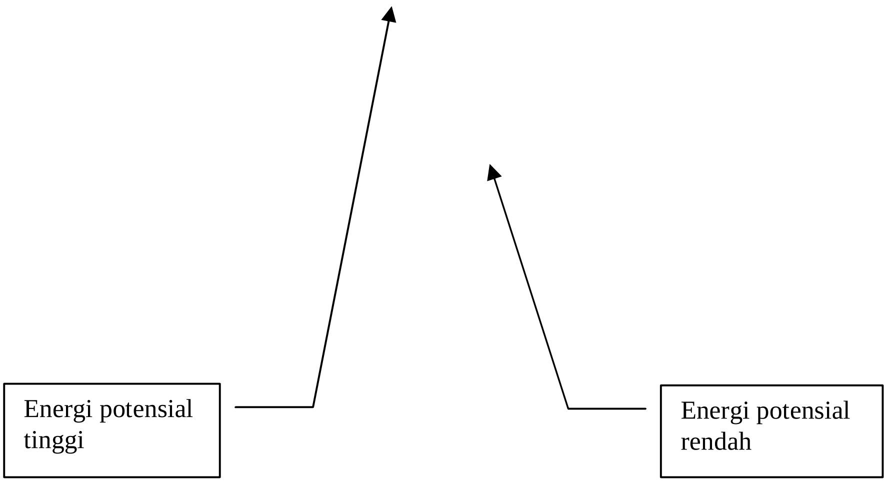
$$\psi(+) = \exp(i\pi x/a) + \exp(-i\pi x/a) = 2\cos(\pi x/a) \qquad (5)$$

dan

$$\psi(-) = \exp(i\pi x/a) - \exp(-i\pi x/a) = 2i\sin(\pi x/a) \qquad (6)$$

Kedua fungsi gelombang $\psi(+)$ dan $\psi(-)$ menumpukkan elektron di dua tempat yang berbeda, dan karena itu, kedua kelompok elektron itu memiliki nilai energi potensial yang berbeda. Inilah asal mula adanya celah energi. Hal ini dapat dijelaskan lebih lanjut sebagai berikut.





Gambar 4. Rapat peluang (rapat muatan) ρ (+) dan ρ (-) di sekitar inti atom dalam sebuah kristal satu dimensi

Rapat peluang (ρ) atau dalam hal ini sama dengan rapat muatan (karena fungsi gelombang yang kita bicarakan adalah fungsi gelombang elektron) untuk kedua gelombang berdiri di atas adalah sebagai berikut:

$$\rho(+) = \psi^{*}(+)\psi(+) = |\psi(+)|^2 = 4\cos^2 \pi x/a \qquad (7)$$

$$\rho(-) = \psi^{*}(-)\psi(-) = |\psi(-)|^2 = 4\sin^2 \pi x/a \qquad (8)$$

Persamaan (7) akan menumpukkan elektron (muatan-muatan negatif) di atas ion-ion positif (di atas badan atom) yang dipusatkan di titik-titik $x = 0$, $\pm$ a, $\pm$ 2a, $\pm$ 3a, dst, lihat Gambar 4. Jadi kelompok elektron ini berada di daerah yang berenergi potensial rendah, lihat Gambar 4. Sedangkan persamaan (8) akan menumpukkan elektron-elektron tersebut di tengah-tengah antara ion-ion positif tersebut, sehingga elektron-elektron ini memiliki energi potensial yang tinggi. (Catatan: dalam hal ini, apa yang kita maksud dengan ion-ion positif adalah inti atom dan elektron-elektron bagian dalam atau sering kita sebut dengan badan atom, kecuali elektron konduksi, sebab atom-atom itu akan diionisasi pada saat elektron valensi diambil untuk dijadikan elektron konduksi)

Fungsi gelombang di titik A tepat di bawah celah energi pada Gambar 3 di atas adalah $\psi(+)$ sedangkan di titik B tepat di atas celah energi adalah $\psi(-)$. Tepat pada batas dearah Brillouin pertama, yaitu di k = $\pm \pi/a$ kedua fungsi gelombang $\psi(+)$ dan $\psi(-)$ yang dinormalisasi masing masing adalah $\sqrt{2} \cos \pi x/a$ dan $\sqrt{2} \sin \pi x/a$. Jika kita misalkan energi potensial sebuah elektron di titik x dalam kristal itu adalah

$$U(x) = U \cos 2\pi x/a,$$

maka kita dapat menentukan nilai energi celah, E_g (yaitu perbedaan energi potensial antara kedua kelompok elektron) sebagai berikut:

$$E_g = \int_0^1 dx\ U(x)\ \{|\psi(+)|^2 - |\psi(-)|^2\} \qquad (9)$$

$$E_g = \int_0^1 dx\ \ U \cos (2\pi x/a)\{|\sqrt{2} \cos \pi x/a|^2 - |\sqrt{2} \sin \pi x/a|^2\}$$

$$E_g = 2 \int_0^1 dx\ \ U \cos (2\pi x/a)\{|\cos \pi x/a|^2 - |\sin \pi x/a|^2\}, \qquad (10)$$

dan dari trigonometri Anda tahu bahwa $\cos 2\alpha = \cos^2\alpha - \sin^2\alpha$, sehingga $|\cos \pi x/a|^2 - |\sin \pi x/a|^2 = \cos^2 (\pi x/a) - \sin^2 (\pi x/a) = \cos (2\pi x/a)$. Jadi persamaan (10) dapat ditulis sebagai berikut:

$$E_g = 2\ U \int_0^1 dx\ \ \cos (2\pi x/a) \cos (2\pi x/a)$$

$$E_g = 2\ U \int_0^1 dx\ \ \cos^2 (2\pi x/a) = 2\ U \int_0^1 dx\ \ [1 - \sin^2 (2\pi x/a)]. \qquad (11)$$

$$E_g = 2\,U\{\int_0^1 dx - \int_0^1 dx \;\; \sin^2(2\pi x/a)\} \qquad (12)$$

Seperti Anda ketahui bahwa suku pertama dalam kurung { } dari persamaan (12) adalah benilai 1. Selanjutnya marilah kita hitung suku kedua dalam tanda kurung { }dari persamaan (12). Dari matematika, Anda tahu bahwa

$$\int_0^1 dy \;\; \sin^2 y = ½\, y – ¼ \sin 2y. \qquad (13)$$

Sekarang kita misalkan

$$y = x\,, \qquad (14)$$

sehingga dy/dx = 1 atau

$$dx = dy. \qquad (15)$$

Dari persamaan (14) Anda lihat bahwa jika

$x = 0, \quad y = 0$

$x = 1, y = 1$

Substitusikan persamaan-persamaan (14) dan (15) ke dalam suku kedua dari persamaan (12). Hasilnya adalah

$$\int_0^1 dx \;\; \sin^2(2\pi x/a) = \int_0^1 dy \;\; \sin^2(2\pi y) = \left[\frac{1}{2}\,y - \frac{1}{4}\sin 2(2\pi y)\right]_0^1$$

$$= ½ - 0$$

$$= ½ \qquad (16)$$

Akhirnya, substitusikan persamaan (16) ke dalam persamaan (12), sehingga Anda memperoleh:

$$E_g = 2\,U\{\int_0^1 dx - \int_0^1 dx \;\; \sin^2(2\pi x/a)\} = 2U\,\{1 – ½\} = U \qquad (17)$$

Jadi, nilai energi celah ini sama dengan komponen dari deret Fourier energi potensial.

Contoh. Sebuah kristal satu dimensi memiliki energi potensial sebesar $U(x) = 2 \cos 2\pi x/a$ elektron volt, dimana a adalah konstanta kisi kristal tersebut. Tentukanlah nilai kedua rapat peluang di titik x = ½ a dan tentukan pula celah energi kristal tersebut.

Jawab:

a. Rapat peluang

$\rho\,(+) = 2 \cos^2 \pi\,(1/2) = 0$

$\rho\,(-) = 2 \sin^2 \pi\,(1/2) = 2.$

b. Gunakan persamaan (17). Menurut persamaan (17) di atas, nilai celah energi (E_g) itu haruslah sama dengan 2 elektron volt.

Latihan.

Sebuah kristal satu dimensi memiliki energi potensial sebesar $U(x) = 2 \exp(i\pi x/a)$ elektron volt, dimana a adalah konstanta kisi kristal tersebut. Tentukanlah nilai kedua rapat peluang di titik x = ¼ a dan tentukan pula celah energi kristal tersebut.

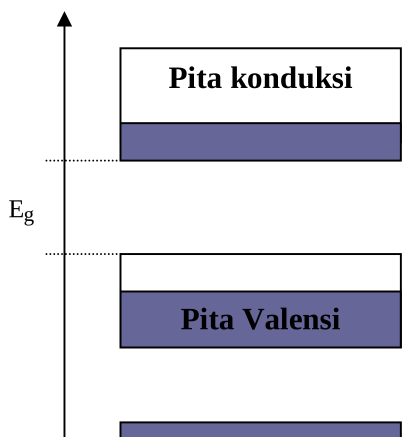
Petunjuk menjawab soal latihan.

a. Gunakan Persamaan (9)

b. Gunakan fungsi gelombang $\psi(+) = \sqrt{2} \cos \pi x/a$ dan $\psi(-) = \sqrt{2} \sin \pi x/a$.

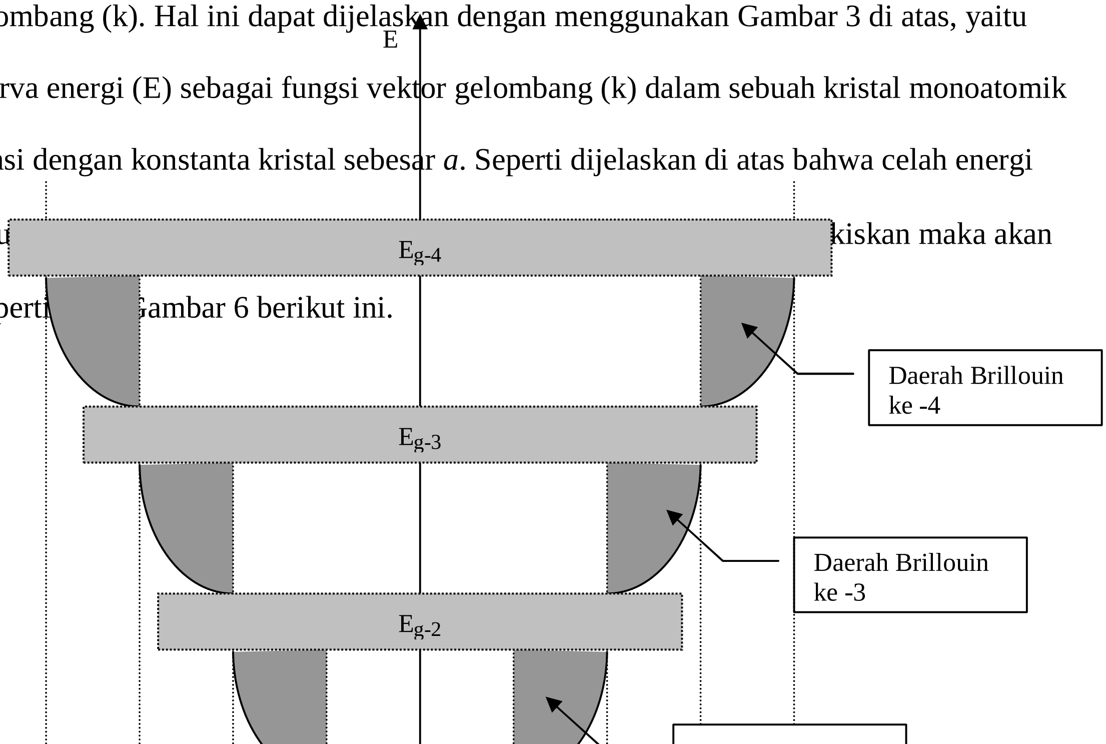
c. Ikuti langkah matemaika seperti dalam contoh di atas.

Di dalam pelajaran Fisika di SMA, Anda biasa diberi materi pelajaran tentang teori pitan energi yang biasa dinyatakan dalam bentuk bagan pita seperti berikut di bawah ini.



Gambar 5. Model teori pita energi di jenjang Sekolah Menengah Atas. Lebar pita dalam arah horizontal belum diberi arti fisis apa-apa.

Anda sudah memahami arti sumbu vertikal dalam bagan yang ditunjukkan dalam Gambar 5 di atas, yaitu sebagai sumbu energi, sehingga lebar pita dalam arah vertikal sama dengan lebar rentang energi dari pita tersebut. Tetapi apakah arti lebar pita dalam arah horizontal ? Apakah nama sumbu horizontal dalam bagan tersebut ? Jawabnya adalah bahwa lebar pita dalam arah horizontal menyatakan lebar satu daerah Brillouin, dan sumbu horizontal menyatakan sumbu vektor gelombang (k). Hal ini dapat dijelaskan dengan menggunakan Gambar 3 di atas, yaitu tentang kurva energi (E) sebagai fungsi vektor gelombang (k) dalam sebuah kristal monoatomik satu dimensi dengan konstanta kristal sebesar *a*. Seperti dijelaskan di atas bahwa celah energi terjadi untu kiskan maka akan tampak seperti ambar 6 berikut ini.



Gambar 6. Daerah Brillouin ke-1 sampai ke-4. Lebar setiap daerah Brillouin selalu sama, yaitu sebesar $2\pi/a$.

Dari Gambar 6 tampak bahwa lebar setiap daerah Brillouin adalah selalu sama, yaitu sebesar $2\pi/a$. Oleh karena itu, lebar pita dalam Gambar 5 di atas selalu sama. Dalam hal ini satu daerah Brillouin menyatakan satu pita energi.

Adanya energi celah ini merupakan karakteristik yang sangat penting dalam logam. *Energi celah ini merupakan hasil interaksi antara fungsi gelombang elektron konduksi dengan badan atom (core) dalam kristal*. Selanjutnya, marilah kita bahas nilai energi celah tersebut secara matematik. Untuk itu, pertama kita tentukan fungsi gelombang elektron dalam kristal yang periodik. Fungsi gelombang elektron itu akan kita tentukan dengan menggunakan teorema Bloch.

1. Teorema Bloch

Anda ketahui bahwa persamaan Schrodinger untuk elektron yang bergerak dalam energi potensial yang nilainya tetap (V_0) dan satu dimensi dapat ditulis dalam bentuk persamaan berikut:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V_0)\,\psi(x) = 0. \qquad (1)$$

dengan solusi untuk persamaan tersebut adalah berupa gelombang bidang (datar) yang berbentuk sebagai berikut:

$$\psi(x) = e^{\pm ikx} \qquad (2)$$

dimana $(E - V_0) = \hbar^2k^2/2m$ = energi kinetik.

Untuk elektron yang bergerak dalam energi potensial periodik satu dimensi, persamaan Schrodingernya adalah sebagai berikut:

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V(x))\,\psi(x) = 0 \qquad (3)$$

Di sini V(x) tidak lagi konstan, tetapi merupakan fungsi dari posisi (x). Di samping itu, energi potensial V(x) ini adalah juga periodik dengan perioda sama dengan konstanta kisi (a). Artinya,

$$V(x) = V(x + a) \qquad (4)$$

Solusi untuk persamaan (3) di atas diatur oleh sebuah teorema, yaitu *teorema Bloch*. Berdasarkan teorema ini, solusi untuk persamaan (3) di atas adalah sama dengan gelombang-gelombang datar (seperti pada persamaan (2) di atas) yang dimodulasi oleh sebuah fungsi $u_k(x)$ yang memiliki perioda yang sama dengan konstanta kisi (a).

Jadi menurut teorema tersebut, solusi yang cocok untuk persamaan (3) adalah

$$\psi(x) = e^{\pm ikx} u_k(x) \qquad (5)$$

dimana $u_k(x) = u_k(x + a)$.

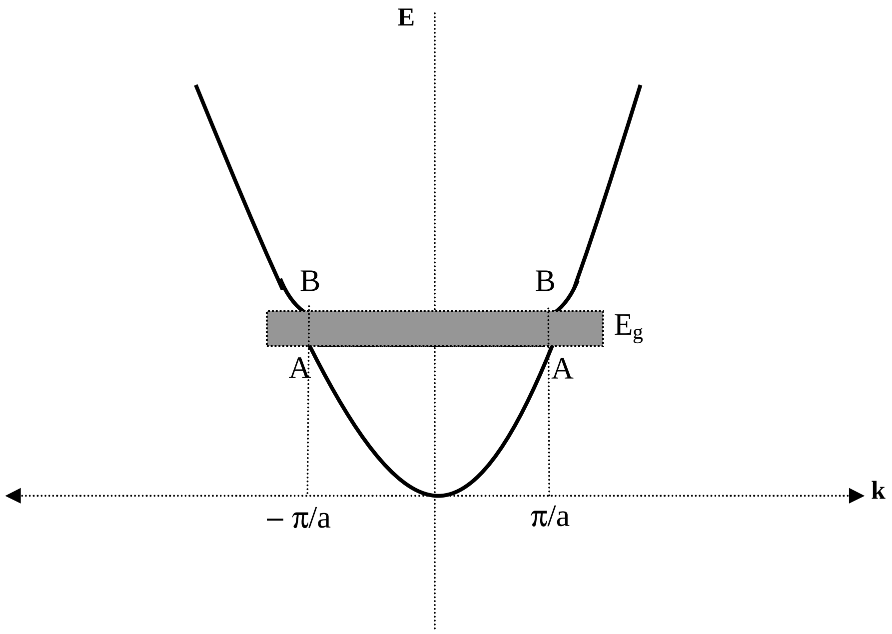
Persamaan (5) sering disebut sebagai *fungsi Bloch*. Fungsi Bloch ini akan digunakan dalam KB 2 modul ini untuk menghitung nilai energi celah dengan menggunakan persamaan sentral.

Rangkuman.

1. Pendekatan tentang energi potensial. Pendekatan yang digunakan untuk mempelajari teori pita energi menyatakan bahwa badan atom atom itu dianggap diam dan energi potensial itu merupakan fungsi yang periodik dengan perioda sebesar konstanta kisi (a) kristal.

2. Teori yang digunakan untuk memahami teori pita energi adalah *teori elektron hampir bebas* atau sering disebut *model elektron hampir bebas*.

3. Menurut model elektron hampir bebas, kurva energi sebagai fungsi vektor gelombang adalah sebagai berikut.



Kurva energi (E) sebagai fungsi vektor gelombang (k) dalam sebuah kristal monoatomik satu dimensi dengan konstanta kristal sebesar *a*. Celah energi E_g yang ditunjukkan terjadi pada k = $\pm$ π/a.

4. Celah energi-celah energi terjadi untuk nilai-nilai k = $\pm$ nπ/a, dimana n = 1, 2, 3, dst.

5. fungsi gelombang di titik $k = \pm \pi/a$ merupakan fungsi gelombang hasil interferensi antara gelombang yang berjalan ke kanan dan ke kiri. Hasilnya, fungsi gelombang di titik $k = \pm \pi/a$ merupakan gelombang berdiri

   $$\psi(+) = \exp(i\pi x/a) + \exp(-i\pi x/a) = 2\cos(\pi x/a)$$

   dan

   $$\psi(-) = \exp(i\pi x/a) - \exp(-i\pi x/a) = 2i\sin(\pi x/a)$$

   Kedua fungsi gelombang $\psi(+)$ dan $\psi(-)$ menumpukkan elektron di dua tempat yang berbeda, dan karena itu, kedua kelompok elektron itu memiliki nilai energi potensial yang berbeda. Akibatnya timbulah celah energi. Inilah asal mula celah energi.

6. Rapat peluang atau rapat muatan adalah

   $$\rho(+) = \psi^*(+)\psi(+) = |\psi(+)|^2 = 4\cos^2 \pi x/a$$

   $$\rho(-) = \psi^*(-)\psi(-) = |\psi(-)|^2 = 4\sin^2 \pi x/a$$

7. Jika energi potensial sebuah elektron di titik x dalam kristal itu adalah

   $$U(x) = U \cos 2\pi x/a,$$

   maka nilai energi celah itu sama dengan U.

8. Lebar pita energi dalam arah horizontal adalah selalu sama, yaitu sebesar $2\pi/a$. Lebar pita ini sama dengan lebar satu daerah Brillouin.

9. *Energi celah ini merupakan hasil interaksi antara fungsi gelombang elektron konduksi dengan badan atom (core) dalam kristal.*

10. Fungsi Bloch dinyatakan dalam bentuk matematik

    $\psi(x) = e^{\pm ikx} u_k(x)$.

Tes Formatif –1.

Petunjuk.
Jawablah semua pertanyaan/soal di bawah ini dengan cara memberi tanda silang pada huruf di depan option yang disediakan.

1. Menurut teori elektron hampir bebas, energi potensial elektron valensi akibat adanya inti atom dan elektron-elektron lainnya adalah
   a. tetap.
   b. merupakan fungsi yang periodik.
   c. nol.
   d. tidak menentu.
2. Menurut teori elektron hampir bebas, celah energi terjadi untuk nilai-nilai vektor gelombang k :
   a. $\pm n\pi/a$
   b. $\pm na/\pi$
   c. $\pm n\pi/2a$
   d. $\pm na/2\pi$
3. Fungsi gelombang tepat di atas celah energi adalah sama dengan
   a. $2i \sin (\pi x/a)$
   b. $\exp (i\pi x/a)$
   c. $2 \cos (\pi x/a)$
   d. $\exp (-i\pi x/a)$
4. Fungsi gelombang tepat di bawah celah energi adalah sama dengan
   a. $2i \sin (\pi x/a)$
   b. $\exp (i\pi x/a)$
   c. $2 \cos (\pi x/a)$
   d. $\exp (-i\pi x/a)$
5. Rapat muatan $\rho(+) = |\psi(+)|^2$ menumpukan elektron
   a. di tengah-tengah antara dua inti atom
   b. merata di antara dua atom.
   c. di ujung kristal

d. di atas inti atom.

6. Rapat muatan $\rho(-) = |\psi(-)|^2$ menumpukan elektron
   a. merata di antara dua atom.
   b. di tengah-tengah antara dua inti atom
   c. di ujung kristal
   d. di atas inti atom.
7. Lebar pita energi dalam arah horizontal adalah selalu sama, yaitu sebesar
   a. π/a.
   b. a/π.
   c. $2\pi/a$.
   d. $a/2\pi$.
8. Lebar pita energi dalam arah horizontal adalah sama dengan lebar,
   a. ½ daerah Brillouin.
   b. 1 daerah Brillouin.
   c. ¼ daerah Brillouin.
   d. 2 daerah Brillouin.
9. Energi potensial sebuah elektron konduksi di suatu titik x dalam sebuah kristal satu dimensi dinyatakan oleh $U(x) = 4 \cos 2\pi x/a$ elektron volt, dimana a menyatakan konstanta kisi kristal tersebut. Berapakah nilai celah energi kristal itu ?
   a. 2 elektron volt.
   b. ½ elektron volt.
   c. 4 elektron volt.
   d. ¼ elektron volt.
10. Fungsi Bloch dapat dinyatakan oleh persamaan gelombang berikut:
    a. $\psi(x) = e^{\pm ikx} /u_k(x)$.
    b. $\psi(x) = e^{\pm ikx} u_k(x)$.
    c. $\psi(x) = u_k(x)/e^{\pm ikx}$.
    d. $\psi(x) = e^{\pm ikx} + u_k(x)$.

Tindak Lanjut (Balikan):

Cocokanlah jawaban Anda dengan kunci jawaban tes formatif 1 pada akhir modul ini, dan berilah skor (nilai) sesuai dengan bobot nilai setiap soal yang dijawab dengan benar. Kemudian jumlahkan skor yang Anda peroleh lalu gunakan rumus di bawah ini untuk mengetahui tingkat penguasaan (TP) Anda terhadap materi KB-1 ini.

Rumus (TP) = (jumlah skor yang diperoleh/skor total) x 100 %

Arti TP yang Anda peroleh adalah sebagai berikut :

90 % - 100 % = baik sekali.

80 % - 89 % = baik

70 % - 79 % = cukup

< 70 % = rendah.

Apabila TP Anda $\geq$ 80 %, maka Anda boleh melanjutkan pada materi KB 2, dan Selamat !!, Tetapi jika TP Anda < 80 %, Anda harus mengulang materi KB-1 di atas terutama bagian-bagian yang belum Anda kuasai.