



# PENDAHULUAN FISIKA ZAT PADAT

**Mustika Wati  
Dewi Dewantara**

Editor: Saiyidah Mahtari



# **PENDAHULUAN**

## **FISIKA ZAT PADAT**

**Mustika Wati**  
**Dewi Dewantara**

Editor: Saiyidah Mahtari

Diterbitkan oleh:  
Lambung Mangkurat University Press, 2023  
d/a Pusat Pengelolaan Jurnal dan Penerbitan ULM Lantai 2  
Gedung Perpustakaan Pusat ULM  
Jl. Hasan Basri, Kayutangi, Banjarmasin, 70123 Telp/Fax.  
0511- 3305195  
(Anggota APPTI: No. 004.035.1.03.2018)

Hak cipta dilindungi oleh Undang-undang Dilarang  
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin  
tertulis dari Penerbit, kecuali untuk kutipan singkat demi  
penelitian ilmiah atau resensi

i - ix+ 115 hlm; 15.5 x 23 cm Cetakan Pertama, November  
2020 ISBN: ....

## PRAKATA

Cabang ilmu fisika yang membahas sistem zat padat disebut sebagai fisika zat padat, yang mana fungsi dasar dari ilmu ini adalah untuk mempelajari bagaimana sifat atom suatu zat padat mempengaruhi sifat keseluruhannya. Oleh karena itu, Pendahuluan Fisika Zat Padat menjadi salah satu mata kuliah wajib yang ada di program studi Pendidikan Fisika, Universitas Lambung Mangkurat (ULM).

Fisika zat padat menjadi salah satu bidang studi yang berkembang pesat. Akan tetapi, hingga saat ini, masih jarang di jumpai buku berbahasa Indonesia yang membahas topik tersebut. Buku ini disusun sebagai produk akhir perkuliahan fisika zat padat dengan maksud untuk menambah perbendaharaan literatur bidang ilmu fisika, khususnya pada topik fisika zat padat.

Penyusunan buku ini didasarkan atas materi-materi pendahuluan yang mudah dipelajari bagi mahasiswa yang tertarik untuk mengenal zat padat. Meskipun demikian, penggunaan buku ini tidak hanya ditujukan untuk mahasiswa Pendidikan Fisika Universitas Lambung Mangkurat saja, tetapi juga dapat di gunakan sebagai salah satu referensi untuk mahasiswa dan dosen bagi mata kuliah sejenis di perguruan tinggi lain, bahkan juga untuk kalangan umum.

Bagi mahasiswa, Anda akan mempelajari topik-topik yang sangat mendasar dari zat padat. Anda akan mempelajari tentang ide-ide dasar dan prinsip-prinsip yang paling sering digunakan dalam zat padat. Penyajian buku ini dimulai dari

pembahasan struktur kristal, dilanjutkan dengan dinamika kisi, elektron dalam logam, semikonduktor, sifat dielektrik zat padat, hingga akhirnya di tutup dengan pembahasan sifat magnetik zat padat.

Dalam buku ini, lebih banyak disajikan teori dan (tidak sedikit) berupa pembuktian matematis. Beberapa pembuktian matematis dibiarkan tidak lengkap sepenuhnya agar Anda memiliki kesempatan untuk mendiskusikan hal tersebut bersama teman sejawat Anda. Hal tersebut juga dapat membuat Anda dapat berlatih sehingga lebih mahir dalam menguasai konsep dasar fisika zat padat. Pada beberapa bab juga disematkan kolom Pengayaan yang berfungsi memperkaya pengetahuan Anda mengenai istilah-istilah yang mungkin asing terdengar bagi Anda. Selain itu, buku ini juga dilengkapi beberapa contoh soal untuk memudahkan pembaca dalam memahami materi yang di sediakan. Pada akhir setiap bab disediakan lima butir soal-soal latihan yang kami harapkan dapat dicoba untuk diselesaikan oleh pembaca, agar pemahaman dalam setiap bab dapat lebih sempurna.

Sebagai penutup, segala bentuk kesalahan yang (bisa saja) muncul dalam buku ini adalah sepenuhnya kesalahan kami, dan kami meminta maaf kepada seluruh pembaca atas hal tersebut. Oleh karena itu, kami sangat berharap koreksi, saran dan masukan dari seluruh pihak agar buku ini dapat kami kembangkan pada edisi selanjutnya.

Salam,

Tim Penulis



# KATA PENGANTAR

Fisika zat padat adalah studi tentang sifat fisik bahan yang berada dalam keadaan padat. Fisika zat padat adalah cabang dasar fisika yang berkaitan dengan struktur, perilaku dan manipulasi padatan, dari padatan kristal sederhana hingga struktur nano yang kompleks. Fisika zat padat juga merupakan salah satu bidang studi yang penting dan memiliki dampak besar pada dunia. Dari pengembangan elektronik canggih hingga penemuan bahan baru dengan sifat unik, kemajuan yang dibuat dalam fisika keadaan padat telah membantu membentuk dunia tempat kita hidup saat ini.

Bidang fisika zat padat telah membuat langkah luar biasa dalam beberapa abad terakhir serta telah berdampak besar pada berbagai teknologi, termasuk elektronik, telekomunikasi, ilmu material dan bahkan energi terbarukan. Dari pengembangan transistor, yang merevolusi bidang elektronik, hingga penemuan bahan baru dengan sifat unik, fisika keadaan padat telah berada di garis depan kemajuan teknologi.

Salah satu gagasan utama fisika zat padat adalah studi tentang interaksi antara partikel penyusun bahan padat. Interaksi ini dapat bersifat elektromagnetik, seperti gaya antar atom dalam kisi kristal, atau mereka dapat dimediasi oleh pertukaran partikel, seperti fonon dalam getaran kisi atau elektron dalam transportasi elektronik. Memahami interaksi ini sangat penting untuk memprediksi dan mengendalikan sifat-sifat bahan, dan telah mengarah pada pengembangan berbagai teknologi, seperti semikonduktor, superkonduktor, dan bahan fotovoltaiik (sel surya).

Aspek penting lain dari fisika zat padat adalah studi tentang perilaku bahan pada skala nano. Pada tingkat ini, sifat-sifat bahan dapat sangat berbeda dari yang diamati pada skala makro, salah satunya disebabkan oleh pengaruh efek kuantum. Studi tentang bahan berstruktur nano telah mengarah pada pengembangan bahan baru dengan sifat unik, seperti peningkatan kekuatan bahan, konduktivitas listrik, dan sifat optik.

Buku ini memberikan pengantar yang komprehensif tentang konsep dasar dan prinsip-prinsip fisika keadaan padat. Buku ini dimulai dengan pembahasan struktur kristal, dinamika kisi, elektron dalam logam, semikonduktor, sifat dielektrik zat padat, hingga akhirnya di tutup dengan pembahasan sifat magnetik zat padat. Selain itu, buku ini membahas perkembangan terbaru di lapangan, seperti superkonduktivitas, yang berpotensi merevolusi cara kita berpikir dan menggunakan bahan-bahan tertentu agar dapat dimanfaatkan sebaik mungkin.

Hal-hal tersebut sangat berguna untuk menumbuhkan minat penelitian, seperti yang berkembang akhir-akhir ini dalam penggunaan metode komputasi untuk mempelajari zat padat. Metode ini, yang berkisar dari model kisi sederhana hingga perhitungan yang canggih, sehingga memungkinkan para peneliti untuk memprediksi dan memahami sifat-sifat bahan pada skala atom.

Buku ajar ini dapat menjadi sebuah panduan dasar yang penting untuk membangun pengetahuan atas konsep dan prinsip dasar dari bidang zat padat yang sangat menarik dan terus berkembang ini.

Editor

# DAFTAR ISI

<b>PRAKATA .....</b>	<b>IV</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>II</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>II</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>	<b>IX</b>
<b>SINOPSIS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>BAB I SUSUNAN KRISTAL.....</b>	<b>1</b>
A. STRUKTUR KRISTAL .....	1
B. JENIS-JENIS KISI .....	5
C. SIMETRI KRISTAL.....	12
D. DIFRAKSI PADA KRISTAL.....	13
E. CACAT KRISTAL .....	16
F. RANGKUMAN .....	18
G. UJI KOMPETENSI.....	19
<b>BAB II DINAMIKA KISI.....</b>	<b>20</b>
A. GETARAN KISI.....	20
B. KALOR JENIS ZAT PADAT .....	25
C. EFEK ANHARMONIK .....	34
D. KONDUKTIVITAS TERMAL .....	34
E. RANGKUMAN .....	36
F. UJI KOMPETENSI.....	37
<b>BAB III ELEKTRON DALAM LOGAM .....</b>	<b>38</b>
A. SIFAT KHAS LOGAM.....	38
B. TEORI-TOERI ELEKTRON PADA LOGAM.....	40
C. TEORI PITA ZAT PADAT.....	44
D. DINAMIKA GERAK ELEKTRON.....	48
E. SUPERKONDUKTIVITAS .....	52
F. RANGKUMAN .....	54
G. UJI KOMPETENSI.....	56
<b>BAB IV SEMIKONDUKTOR.....</b>	<b>57</b>

A. PENGERTIAN SEMIKONDUKTOR.....	57
B. JENIS-JENIS SEMIKONDUKTOR.....	58
C. KONSEP LUBANG ELEKTRON ( <i>HOLE</i> )....	61
D. KONSENTRASI MUATAN PEMBAWA DALAM SEMIKONDUKTOR.....	63
E. PENERAPAN SEMIKONDUKTOR.....	65
F. RANGKUMAN.....	68
G. UJI KOMPETENSI.....	69
<b>BAB V SIFAT DIELEKTRIK ZAT PADAT .....</b>	<b>70</b>
A. PENGERTIAN DIELEKTRIK.....	70
B. POLARISASI DAN SUSEPTIBILITAS LISTRIK .....	72
C. KONSTANTA DAN POLARISABILITAS DIELEKTRIK .....	73
D. EFEK LAIN .....	75
E. RANGKUMAN .....	77
F. UJI KOMPETENSI.....	78
<b>BAB VI SIFAT MAGNETIK ZAT PADAT .....</b>	<b>79</b>
A. SUSEPTIBILITAS MAGNETIK .....	79
B. DIAMAGNETIK .....	81
C. PARAMAGNETIK .....	84
D. FEROMAGNETIK .....	89
E. ANTI FEROMAGNETIK.....	94
F. RANGKUMAN .....	97
G. UJI KOMPETENSI.....	98
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>100</b>
<b>GLOSARIUM .....</b>	<b>103</b>
<b>INDEKS .....</b>	<b>114</b>
<b>LAMPIRAN-LAMPIRAN.....</b>	<b>117</b>

## UCAPAN TERIMA KASIH

Buku ajar Pendahuluan Fisika Zat Padat ini dipersiapkan sedemikian rupa sehingga diharapkan mampu membantu mahasiswa untuk memahami konsep-konsep dasar fisika zat padat. Materi dalam buku ajar ini disesuaikan dengan kebutuhan pembelajaran tingkat mahasiswa serta disajikan dengan bahasa yang mudah dipahami. Dalam penyusunan buku ini kami mengucapkan terima kasih yang begitu besar atas saran, kritik dan bahan materi yang diberikan oleh Editor Saiyidah Mahtari, M.Pd, Banjarmasin; Rahmat Saifuddin Anwar, Banjarmasin; AuFi Arya Nur Arif, Banjarmasin; Nur 'aina, Banjarmasin; Baginda Kahar Aprijal Raja Sianipar, Banjarmasin; Nuq Riyangga, Banjarmasin; Gusti Syntia Patima, Banjarmasin Norma, Banjarmasin; Diyara Berliana Pratiwi, Banjarmasin; Hani Sapna, Banjarmasin; Raisa Hadianti, Banjarmasin; Nor Aulida Rahmi, Banjarmasin; Waasik Murniati, Banjarmasin; Andriana Safitriani, Banjarmasin; Fitria Dewi Firdawati, Banjarmasin; Fitri Norkhalisa, Banjarmasin; Lavenia Wulandari, Banjarmasin; Deftri Sekar Ningrum, Banjarmasin; Eva Amilia, Banjarmasin; Octaviani, Banjarmasin; Asyafaah, Banjarmasin; Risma Ika Safitri, Banjarmasin; Arnal Langgene, Palu; Siti Aisyah Al Humaerah, Palu; Monica Maya Lusua, Banjarmasin; Rizki Maulidia Isnaniah, Banjarmasin; Sri Maryati, Banjarmasin.

Selain itu, tidak lupa pula kami berterima kasih kepada Lambung Mangkurat University Press yang telah bersedia melakukan peninjauan dan penerbitan terhadap naskah buku

ajar yang kami susun ini. Akhir kata kami sangat berterima kasih atas dukungan dan motivasi yang diberikan selama penyusunan buku ajar ini.

## SINOPSIS

Fisika zat padat merupakan salah satu bagian dari ilmu fisika yang mempelajari perilaku dan sifat fisik pada zat berfasa padat. Pada lingkungannya fisika zat padat merumuskan model yang menggunakan hukum-hukum dasar salah satunya seperti magnet listrik untuk menjelaskan perilaku dan fisik zat padat. Analisis zat padat sendiri memerlukan keseimbangan unsur internalnya. Pada bab pertama membahas mengenai materi struktur kristal, kisi ruang unit sel, bentuk kristal, ikatan kristal, difraksi kristal dan cacat kristal.

Berawal dari atom-atom atau gugus atom yang tersusun. Pengetahuan tentang struktur kristal sangat penting pada fisika zat padat. Pada subbab pertama berisi materi struktur kristal, kisi ruang unit sel, bentuk kristal, ikatan kristal, difraksi kristal dan cacat kristal. Struktur kristal salah satu contohnya dapat dilihat pada partikel-partikel yang teratur dalam susunan tiga dimensi yang disebut kisi kristal atau kisi ruang. Kristal sendiri mempunyai empat bentuk yang dijelaskan dalam buku ini. Cacat kristal merupakan ketidaksempurnaan pada struktur dan susunan atom pada kristal cacat kristal ini dibagi menjadi tiga.

Selanjutnya pada materi dinamika kisi, kisi sendiri merupakan sekumpulan titik dalam ruang yang sedemikian rupa sehingga jika titik-titik tersebut dilihat dari berbagai pandang sudut akan terlihat identik satu dengan lainnya. Bab ini terdiri atas struktur kisi, kisi dua dan tiga dimensi, teori elektron bebas, getaran kisi dan sifat termal zat padat. Kisi dua dimensi terbentuk dari dua buah vektor **a** dan **b**. Pada ruang tiga dimensi, terdapat empat belas kisi Bravais berbeda.

Keempat belas kisi tersebut dibagi menjadi tujuh kelompok berdasarkan sel unitnya. Menunjukkan kisi tiga dimensi berdasarkan hubungan vektor dan sudut pembentuknya. Pada teori elektron bebas (*free elektron theory, FET*), setiap logam memiliki sekumpulan elektron bebas yang berperilaku layaknya molekul gas ideal dan bergerak bebas pada ruang logam tersebut.

Setelah materi dinamika kisi menuju materi elektron dalam logam. Logam sendiri merupakan benda yang banyak tersebar di permukaan bumi dan dimanfaatkan oleh manusia dalam kehidupan sehari-hari. Logam menjadi material yang paling dibutuhkan pada berbagai sektor baik itu industri, perkantoran, dan pertukangan. Logam memiliki nilai relatif yang cenderung tinggi dan sifat elastis ketika dipanaskan. Biji logam bisa diperoleh dengan cara penambangan yang tentunya masih berupa bahan mentah yang diperoleh dari keadaan murni seperti emas, emas putih, platina, bismut, serta bisa diperoleh dengan yang bercampur dengan unsur lain seperti sulfur (S), silikon (Si), fosfor (F) karbon (C), serta sesuatu yang bisa diamati disekitar seperti pasir, tanah liat. Bab ini berisi sifat khas logam seperti yang dituliskan diatas, elektron dan proton dalam inti atom, gerak acak dan sistematis elektron, teori elektron bebas klasik serta aplikasi superkonduktor pada bidang transportasi yang menggunakan efek Meissner yang diangkat oleh magnet superkonduktor.

Selain superkonduktor, terdapat pula semikonduktor yakni suatu zat dengan karakteristik listrik di tengah-tengah antara konduktor dan isolator dikenal sebagai semikonduktor. Temperatur, cahaya, dan medan magnet memiliki sedikit pengaruh pada karakteristik listrik konduktor dan isolator, sedangkan semikonduktor sangat sensitif terhadap pengaruh

ini. Pada bab ini selain membahas tentang semikonduktor juga berisi tentang jenis-jenis semikonduktor, teknik pengukuran celah, persamaan gerakan elektron dalam sebuah pita energi dan aplikasi bahan semikonduktor. Aplikasi pada bahan semikonduktor sendiri salah satu contohnya terdapat pada transistor yang merupakan komponen yang pada umumnya banyak digunakan dalam rangkaian elektronika, mulai dari rangkaian dengan kompleksitas rendah hingga level canggih.

Dari semikonduktor yang karakteristiknya di tengah antara konduktor dan isolator terdapat pula zat padat yang sifatnya yang buruk dalam menghantarkan listrik atau bisa dikatakan sebagai bahan isolator. Materi ini akan membahas deskripsi makroskopis pada sifat dielektrik zat padat yakni dapat ditinjau dari kapasitor keping sejajar yang diisi oleh bahan dielektrik. Contoh bahan dielektrik sendiri diantaranya kertas, teflon, karet, mika, berlian dan kaca. Selain itu juga berisi materi tentang dipol listrik, konstanta dielektrik dan polarisabilitas serta efek lain yang dibagi menjadi dua yakni feroelektrisitas dan piezoelektrisitas.

Selain membahas yang berkaitan dengan kelistrikan buku ini ditutup dengan sifat magnetik pada zat padat yang subbabnya membahas tentang suseptibilitas magnetik, diamagnetisme, paramagnetisme, feromagnetisme dan anti feromagnetik. Suseptibilitas magnetik dapat sendiri dapat diartikan sebagai kerentanan suatu benda untuk termagnetisasi. Diamagnetisme adalah bentuk kemagnetan yang sangat lemah yang ditunjukkan oleh zat-zat dengan kerentanan magnetik negatif. Paramagnetisme adalah sifat dari karakteristik bahan yang mana mempunyai momen magnetik permanen dan disejajarkan dengan arah medan magnet dan nilai suseptibilitas magnetiknya berbanding terbalik dengan suhu. Feromagnetik

merupakan suatu bahan yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik positif sangat tinggi. Feromagnetik terdapat pada bahan besi murni, kobalt, nikel, gadolinium, dan disprosium. Anti feromagnetik, yaitu bahan dengan suseptibilitas positif rendah pada semua suhu dengan perubahan suseptibilitas suhu karena kondisi khusus.

Masih banyak materi lainnya yang dibahas pada buku ini selain yang di paparkan diatas. Buku ini, selain berisi materi juga dilengkapi contoh soal, soal latihan dan pembahasannya. Atas dasar itulah buku ini cocok bagi para pembaca untuk memahami dasar-dasar fisika zat padat sebelum masuk ke tingkat materi yang lebih kompleks.

# BAB I

## SUSUNAN KRISTAL

### A. STRUKTUR KRISTAL

Kristal merupakan suatu bahan dimana atom, molekul atau partikel terbungkus dengan lekat atau bergabung dengan cara tertentu dengan sebuah energi potensial yang bernilai kecil. Atas hal itulah, kristal memiliki sebuah bentuk geometri tertentu. Sebuah kristal dapat di katakan ideal ketika dalam ruang tiga dimensi kristal di susun oleh unsur satuan yang sama secara berulang-ulang. Karakteristik kristal yang di kategorikan sebagai kristal sempurna adalah sebagai berikut.

1. Memiliki ukuran yang tidak berhingga
2. Tidak memiliki cacat geometrik
3. Tidak memiliki ketakmurnian kimiawi, dan
4. Pada suhu  $T > 0 \text{ K}$ , atomnya tidak mengalami getaran termal

Pada suatu kristal dalam bentuk dua dimensi dimana kedudukan setiap atom penyusunnya bisa di nyatakan dengan  $\mathbf{R}$ , sebagai kombinasi linier dari dua buah vektor basis yang bersifat tidak unik dan tidak kolinier ( $\mathbf{a}$  dan  $\mathbf{b}$ ) dengan koefisien bilangan bulat ( $n$  dan  $m$ ). Secara matematis, pernyataan itu setara dengan:

$$\mathbf{R} = n\mathbf{a} + m\mathbf{b} \qquad \text{Pers. I.1}$$

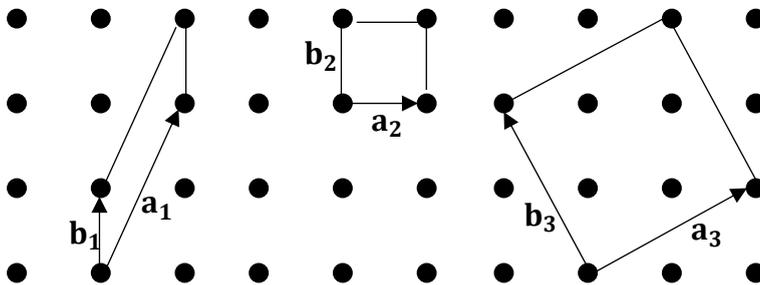
Struktur geometrik dari sebuah kristal di anggap sempurna jika unsur penyusun tepat pada kedudukannya dalam setiap atom dalam ruang. Bentuk pola geometris disebut dengan kisi (*lattices*). *Kisi* adalah suatu deretan dari titik-titik yang dihubungkan oleh operator translasi kisi. Secara konsep

geometri, kisi adalah sekumpulan titik dalam ruang sedemikian sehingga jika titik-titik tersebut dilihat dari berbagai sudut pandang akan terlihat identik satu dengan yang lainnya. Sifat ini disebut dengan sifat *identical surrounding*.

Kisi ini terbagi menjadi dua jenis kisi yaitu kisi bravais dan non-bravais. Sebuah kisi khusus yang mana semua titiknya berada di tempat yang sama atau ekuivalen di sebut dengan *kisi Bravais*. Artinya bahwa titik-titik penyusun kristalnya mempunyai kisi geometris yang sama. Kisi Bravais adalah kisi yang memiliki titik-titik yang bertetangga tepat sama besar jaraknya satu sama lain. *Kisi non-bravais* adalah saat titik-titiknya berada pada tempat yang tidak teratur dan tidak berharga sama.

Perhatikan kembali Pers. I.1, nilai  $\mathbf{a}$  dan  $\mathbf{b}$  adalah suatu vektor yang disebut dengan vektor primitif atau basis sebuah kisi. *Basis* merupakan sebuah gugusan atom yang harus di letakkan dalam setiap titik kisi pada sebuah kristal supaya didapatkan struktur kristal yang sesungguhnya. Sebuah struktur kristal yang nyata dapat diperoleh dari meletakkan sebuah basis disetiap titik kisi.

Untuk memahami sel unit dan sel primitif, bayangkan larik kisi dua dimensi yang dibagi-bagi menjadi beberapa sub-larik kecil seperti gambar berikut ini.

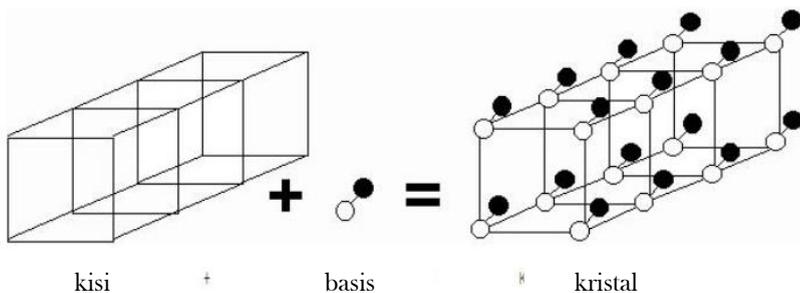


Gambar I.1 Sel satuan dan sel primitif

Jajaran genjang yang dibentuk oleh vektor-vektor  $\mathbf{a}_l, \mathbf{b}_l$  disebut sebagai *sel unit*. Jika titik-titik kisi pada sel unit hanya berada diujung-ujung titik sudut sel, maka sel tersebut disebut sebagai *sel primitif* (misalnya  $\mathbf{a}_1, \mathbf{b}_1$  dan  $\mathbf{a}_2, \mathbf{b}_2$ ). Sel yang bukan primitif disebut *sel non-primitif* (misalnya  $\mathbf{a}_3, \mathbf{b}_3$ ). Beberapa sifat sel primitif adalah sebagai berikut.

1. Sel primitif akan memenuhi/menutupi keseluruhan kisi secara luasan atau volume jika sel diletakkan berderet membentuk pola tertentu.
2. Sel primitif memiliki volume paling kecil.
3. Luas atau volume tiap-tiap sel primitif yang berbeda adalah sama besar, tidak bergantung pada pemilihan vektor translasinya.
4. Setiap sel primitif memiliki satu titik yang sama pada kisi.

Penentuan sel satuan dua dimensi biasanya diambil dari luasan yang terkecil yang menghasilkan daerah yang dapat diplotkan pada kisi, sedangkan dalam tiga dimensi unit sel mengandung pengertian volume. Ada dua sifat unit sel yaitu semua unit sel mempunyai luasan atau volume yang sama dan setiap unit sel hanya mempunyai total titik kisi.



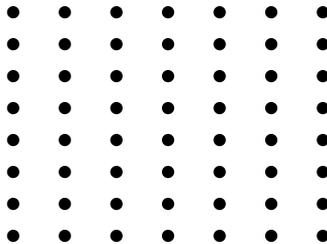
Gambar I.2 Komposisi pembentukan kristal dari kisi dan basis

**Contoh Soal 1.1** *Pembentukan kristal dari basis dan kisi*

Diberikan sebuah sel unit seperti berikut ini.

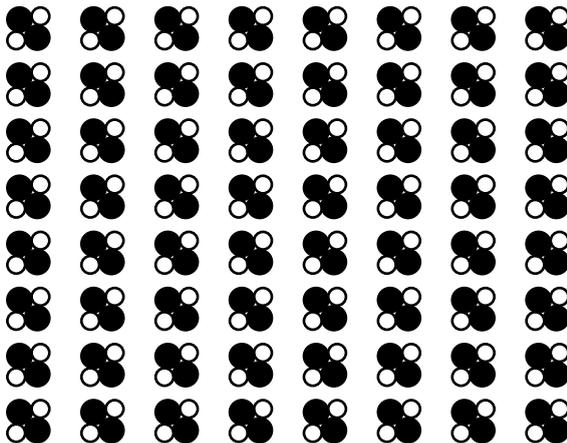


Tentukan bentuk kristal yang akan terbangun ketika sel unit tersebut menempati larik atom yang berbentuk seperti berikut.



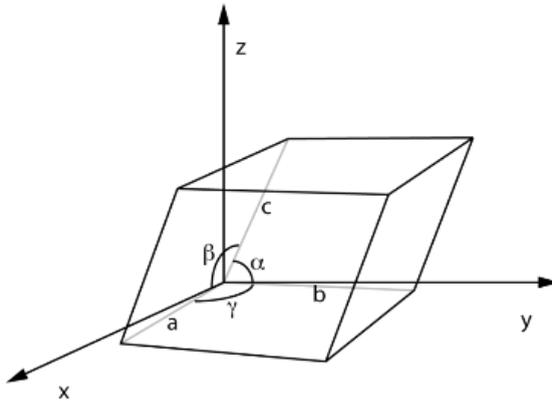
**Jawaban**

Untuk memperoleh bentuk kristal, kita hanya perlu menempatkan sel unit ke titik-titik dalam larik. Dengan demikian, struktur kristal yang terbentuk adalah sebagai berikut.



## B. JENIS-JENIS KISI

Struktur dari sebuah kristal juga digambarkan dalam model tiga dimensi dengan memperkenalkan konsep dari sumbu-sumbu kristalografi dalam sifat simetris dari suatu kristal. Dapat di tunjukkan dengan sebuah parameter  $a, b, c$  dan  $\alpha, \beta, \gamma$  (lihat Gambar I.3).



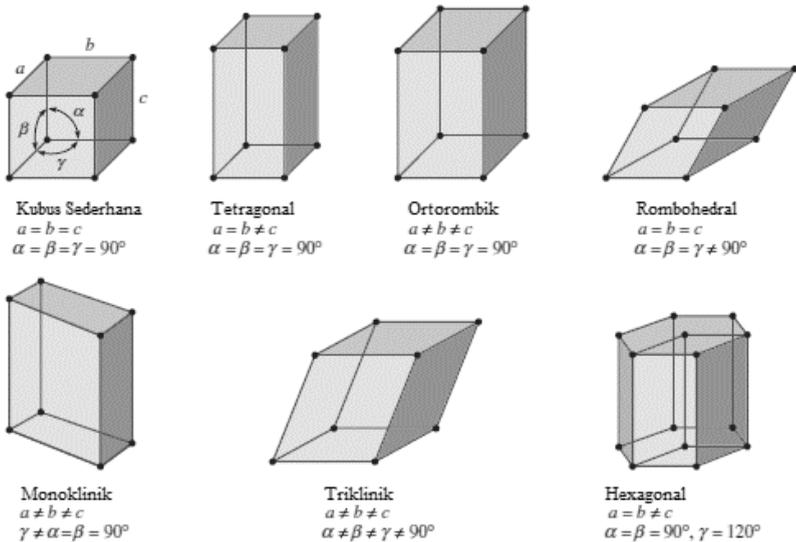
Gambar I.3 Parameter model kisi tiga dimensi

Keterangan gambar:

1. Panjang rusuk  $a$  di gambarkan sepanjang sumbu  $x$ ,
2. Panjang rusuk  $b$  digambarkan sepanjang sumbu  $y$ ,
3. Panjang rusuk  $c$  digambarkan sepanjang sumbu  $z$ , dan
4. Besar sudut  $\alpha$  (sumbu  $zy$ ),  $\beta$  (sumbu  $xz$ ), dan  $\gamma$  (sumbu  $xy$ )

Setiap parameter  $a, b$  dan  $c$  merepresentasikan panjang rusuk sebuah kristal dan untuk  $\alpha, \beta, \gamma$  merupakan parameter besarnya sudut perpotongan antara rusuk satu dengan rusuk yang lain. Dari parameter tiga dimensi tersebut, unit sel dapat ditentukan dengan membentuknya menjadi tujuh macam unit sel. Ketujuh unit sel ini sering dinamakan dengan *tujuh sistem kristal dasar*, karena pada semua titik kisinya berada pada

sudut-sudut unit sel. Adapun ketujuh sistem tersebut disajikan dalam Gambar I.4.



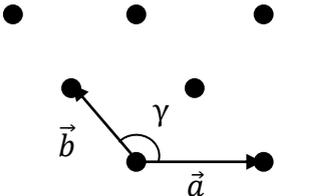
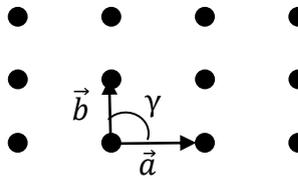
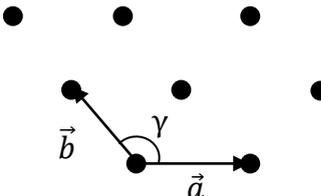
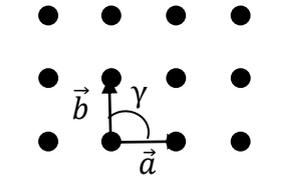
Gambar I.4 Tujuh sistem kristal dasar

Berdasarkan Gambar I.4, posisi sebuah titik dari kisi ini tidak hanya dapat di letakkan pada sudut juga dapat di letakkan pada bagian sisi, yaitu bagian permukaan dan di bagian tengah atau badan kisi. Bravais (1850) menyatakan ada empat macam unit sel berbeda yang termasuk dalam tujuh sistem kristal dasar, yaitu unit sel sederhana (*simple*), pusat badan (*body centered*), pusat muka (*face centered*), dan pusat alas (*base centered*).

### 1. Kisi dua dimensi

Kisi dua dimensi terbentuk dari dua buah vektor **a** dan **b**. Bergantung dengan panjang kedua vektor ini dan sudut  $\gamma$  antara keduanya, kisi dengan berbagai konfigurasi geometris dapat dibentuk. Tabel I.1 menunjukkan beberapa contoh kisi yang dapat dibentuk dari dua vektor translasi.

Tabel I.1 Kisi dua dimensi

Nama Kisi	Syarat	Ilustrasi
Kisi jajargenjang	$a \neq b, \gamma \neq 90^\circ$	 <p>The diagram shows a 2D lattice of points. Two lattice vectors, <math>\vec{a}</math> and <math>\vec{b}</math>, are drawn from a central point. <math>\vec{a}</math> is horizontal, and <math>\vec{b}</math> is at an angle <math>\gamma</math> to <math>\vec{a}</math>. The lattice points are arranged in a parallelogram pattern.</p>
Kisi segi empat	$a \neq b, \gamma = 90^\circ$	 <p>The diagram shows a 2D lattice of points. Two lattice vectors, <math>\vec{a}</math> and <math>\vec{b}</math>, are drawn from a central point. <math>\vec{a}</math> is horizontal and <math>\vec{b}</math> is vertical, forming a right angle <math>\gamma = 90^\circ</math>. The lattice points are arranged in a rectangular grid.</p>
Kisi permata	$a = b, \gamma \neq 90^\circ$	 <p>The diagram shows a 2D lattice of points. Two lattice vectors, <math>\vec{a}</math> and <math>\vec{b}</math>, are drawn from a central point. Both <math>\vec{a}</math> and <math>\vec{b}</math> have the same length, and the angle between them is <math>\gamma</math>. The lattice points are arranged in a rhombic pattern.</p>
Kisi persegi	$a = b, \gamma = 90^\circ$	 <p>The diagram shows a 2D lattice of points. Two lattice vectors, <math>\vec{a}</math> and <math>\vec{b}</math>, are drawn from a central point. Both <math>\vec{a}</math> and <math>\vec{b}</math> have the same length and are perpendicular to each other (<math>\gamma = 90^\circ</math>). The lattice points are arranged in a square grid.</p>

Kisi heksagonal	$a = b, \gamma = 120^\circ$	
-----------------	-----------------------------	--

## 2. Kisi tiga dimensi

Pada ruang tiga dimensi, terdapat empat belas kisi Bravais berbeda. Keempat belas kisi tersebut dibagi menjadi tujuh kelompok berdasarkan sel unitnya (Gambar I.5). Menunjukkan kisi tiga dimensi berdasarkan hubungan vektor dan sudut pembentuknya.

Tabel I.2 Kisi tiga dimensi

Nama Kisi	Syarat
<i>triclinic S</i>	$a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
Monoklinik sederhana Monoklinik basis di pusat	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
Ortohombik sederhana Ortohombik basis di pusat	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonal sederhana	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Trigonal	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
Heksagonal	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Kubik sederhana ( <i>simple cubic, sc</i> )	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

Sama seperti kisi dua dimensi, kisi tiga dimensi dapat dibedakan menjadi monoatom dan gabungan. Kisi monoatom

tiga dimensi memenuhi persamaan vektor yang mirip dengan persamaan  $\mathbf{R}$  pada dua dimensi, yakni:

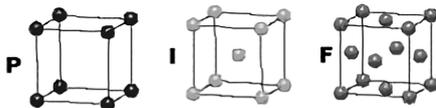
$$\mathbf{R} = n\mathbf{a} + m\mathbf{b} + p\mathbf{c}$$

Pers. I.2

**KUBUS**

$$a = b = c$$

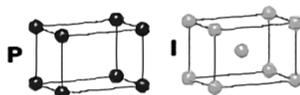
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



**TETRAGONAL**

$$a = b \neq c$$

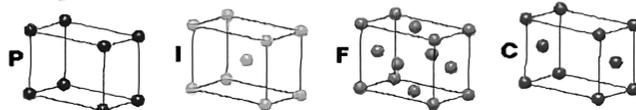
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



**ORTOROMBIK**

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



**HEKSAGONAL**

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ$$

$$\gamma = 120^\circ$$



**TRIGONAL**

$$a = b = c$$

$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$

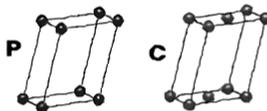


**MONOKLIN**

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \gamma = 90^\circ$$

$$\beta \neq 120^\circ$$



**TRIKLIN**

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$



4 tipe sel unit  
 P = primitif  
 I = pusat badan  
 F = pusat muka  
 C = pusat alas  
 +

Gambar I.5 Jenis-jenis kisi tiga dimensi

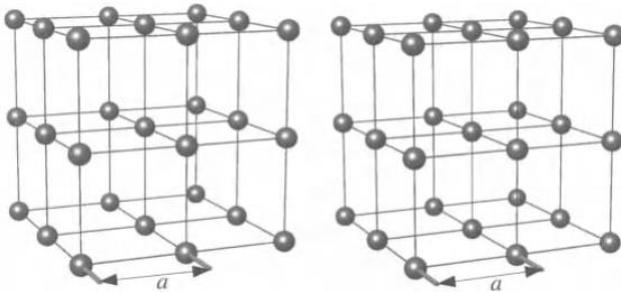
Kisi monoatom terbentuk dari atom-atom dengan satu unsur. Contoh kisi monoatom paling sederhana adalah kisi Bravais. Selain itu, terdapat pula konfigurasi kisi *simple cubic*, *face-centered cubic*, *body-centered cubic*, *hexagonal*, *hexagonal close-packed (hcp)* dan *diamond*. Beberapa jenis konfigurasi kisi dibahas sebagai berikut.

a. Kisi kubus sederhana (*simple cubic, sc*)

<sup>1</sup> Biasanya  $\mathbf{a}$  juga ditulis  $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{b}$  ditulis  $\mathbf{a}_2$  dan  $\mathbf{c}$  ditulis  $\mathbf{a}_3$ .

Kisi kubus sederhana dapat didefinisikan dengan himpunan vektor-vektor primitif berikut.

$$\mathbf{a} = a \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b} = a \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{c} = a \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

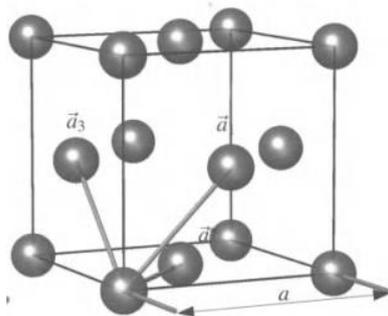


Gambar I.6 Kisi kubus sederhana dengan jarak pemisah antar titik  $a$

Satu-satunya unsur yang memiliki konfigurasi kisi  $sc$  dalam keadaan dasarnya adalah polonium.

b. Kisi *face-centered cubic, fcc*

Kisi  $fcc$  dibentuk dengan meletakkan atom-atom pada ujung sebuah kubus dan disetiap permukaan kubus seperti gambar berikut.



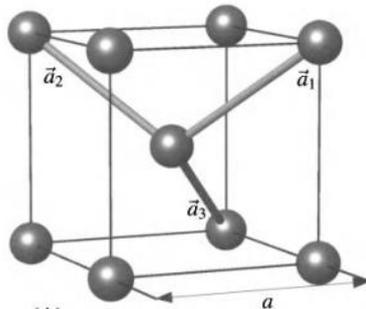
Gambar I.7 Kisi  $fcc$  dengan jarak pemisah antar atom di titik sudut sebesar  $a$

Himpunan vektor primitif yang menggambarkan kisi ini adalah:

$$\mathbf{a} = \frac{a}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b} = \frac{a}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{c} = \frac{a}{2} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

c. Kisi *body-centered cubic*

Kisi *bcc* dibangun dengan cara yang sama dengan kisi *fcc*, tetapi atom-atom tidak diletakkan di permukaan kubus, melainkan tepat di bagian tengah kubus seperti ilustrasi berikut.



Gambar I.8 Kisi *bcc* dengan jarak pemisah antar atom di titik sudut sebesar  $a$

Himpunan vektor primitif untuk kisi *bcc* dengan jarak pemisah antar atom sebesar  $a$  adalah:

$$\mathbf{a} = \frac{a}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{b} = \frac{a}{2} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{c} = \frac{a}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Kisi gabungan terbentuk dari lebih dua jenis unsur. Oleh karena itu, kisi gabungan bukanlah merupakan kisi Bravais. Contoh-contoh kisi gabungan adalah kisi pada struktur natrium klorida (NaCl), sesium klorida (CsCl) dan kalsium fluorid (CaF<sub>2</sub>).

---

**Contoh Soal 1.2** *Sudut ikatan kristal*

Sudut antara ikatan tetrahedral berlian sama dengan sudut besar antara dua diagonal benda kubus. Gunakan analisis vektor dasar untuk menemukan nilai sudut tersebut.

**Jawaban**

Gunakan identitas vektor  $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = ab \cos \beta$ , di mana  $\beta$  adalah sudut antara dua vektor. Ambil dua diagonal kubus yang diberikan oleh vektor  $\mathbf{a} = (1, 1, 1)$  dan  $\mathbf{b} = (1, -1, -1)$ . Dengan menggunakan identitas vektor diperoleh:

$$\begin{aligned}(1, 1, 1) \cdot (1, -1, -1) &= \sqrt{3} \sqrt{3} \cos \beta \\ 1 \cdot 1 + 1(-1) + 1(-1) &= 3 \cos \beta \\ \cos \beta &= -\frac{1}{3}\end{aligned}$$

yang memberikan  $\beta = 109.47^\circ$ .

---

**C. SIMETRI KRISTAL**

Simetri kristal dua dimensi, memiliki sifat yang memenuhi simetri translasi, simetri rotasi, dan simetri refleksi.

1. *Translasi*, jika dalam seluruh kristal bergerak ke atas vektor  $\mathbf{R}$  (menghubungkan dua atom), posisi masing-masing atom kristal dalam kaitannya dengan yang lain tidak berubah, atau keberadaannya tetap sama. Dengan kata lain, kristal tidak berubah untuk gerakan tersebut.
2. *Rotasi*, berputar/memutar di sekitar posisi atom tertentu (pasti semua tidak berubah selama 360 rotasi, ada yang tidak berubah selama 90, 120 atau 180 rotasi).
3. *Refleksi*, cermin yang dipantulkan oleh garis lurus yang melewati serangkaian atom.

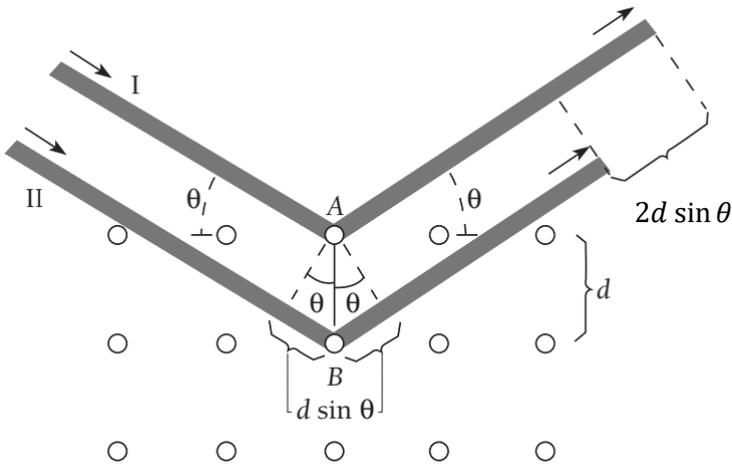
Sistem kristal tiga dimensi memiliki sifat simetri sebagai berikut :

1. *Translasi*, jika seluruh kristal dipindahkan ke atas vektor  $\mathbf{R}$  (menghubungkan dua atom), maka posisi masing-masing atom kristal relatif terhadap atom lainnya tidak berubah atau kehadirannya tetap sama. Dengan kata lain, kristal tidak berubah untuk gerakan tersebut.
2. *Inversi*, struktur kristal disebut simetri terbalik ketika setiap garis yang melewati suatu titik membuat jarak yang sama ke sisi lain dari pusat simetri dan bertemu dengan titik yang identik, atau dengan kata lain, inversi menjadi pusat inversi dengan operasi  $+$  menjadi  $-$ . Semua jaringan Bravais memilikinya.
3. *Refleksi*, struktur kristal dapat dibagi dimana satu belahan merupakan cerminan dari belahan lainnya. rotasi, rotasi terhadap sumbu rotasi. Sumbu rotasi ini disebut  $N$  jika invariant rotasinya adalah  $2\pi/N$ . Kemungkinan nilai  $N$  adalah 1, 2, 3, 4, dan 6. Tidak ada kisi yang tetap dapat disebut kisi dengan putaran  $2\pi/5$ .
4. *Glide* (luncuran), gabungan efek pemantulan dan translasi.
5. *Screw*, gabungan efek rotasi dan translasi.

#### **D. DIFRAKSI PADA KRISTAL**

Pada padatan kristal, terdapat beberapa kelompok bidang atom paralel yang masing-masing bertindak sebagai kisi difraksi tiga dimensi. W. L. Bragg pada tahun 1913 menunjukkan penjelasan sederhana mengenai peristiwa difraksi gelombang elektromagnetik pada kristal. Akan tetapi, meskipun penjelasan Bragg sangat sederhana karena hanya menggunakan optika geometri, tetapi hasil ini identik dengan penurunan yang lebih kompleks dari von Laue dan Ewald.

Misalkan terdapat sejumlah kisi persegi sederhana seperti Gambar I.9<sup>\*</sup>.



Gambar I.9 Ilustrasi difraksi Bragg

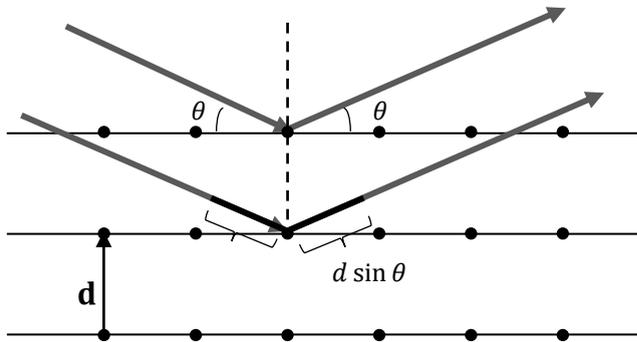
Pada kisi tersebut ditembakkan seberkas sinar-x paralel yang memiliki panjang gelombang  $\lambda$  yang kemudian berinteraksi dengan semua atom kisi yang tersinari. Anggap  $\theta$  adalah sudut yang dibuat oleh sinar datang terhadap bidang kisi. Mula-mula sinar akan menabrak atom A pada kisi pertama, diikuti atom B pada kisi kedua. Pada kedua sinar pantul dari A dan B terjadi interferensi konstruktif yang menyebabkan perbedaan panjang lintasannya sebesar  $n\lambda$  dengan  $n$  bilangan bulat. Berdasarkan hukum Snellius, besar kedua sudut pantul (baik dari A dan B) adalah sama besar dengan sudut datang masing-masing berkas pada atom tersebut. Syarat kedua adalah, agar kedua sinar

<sup>\*</sup> Bayangkan Anda menumpuk beberapa selimut dan Anda memandangnya dari sisi samping. Dengan demikian, Anda dapat menghitung bahwa lapisan selimut tersebut berjumlah empat, begitupula ilustrasi yang diberikan oleh Gambar I.9.

kembali sefase dan sinar kedua menempuh jarak  $2d \sin \theta$  lebih panjang, maka haruslah berlaku:

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{Pers. I.3}$$

Meskipun persamaan difraksi Bragg menjadi pemahaman dasar bagi difraksi pada kristal, tetapi pada kenyataannya persamaan tersebut tidak dapat menggambarkan kristal sesungguhnya. Persamaan Laue menjadi salah satu solusi yang dapat digunakan. Bayangkan kembali beberapa kisi bertumpuk seperti sebelumnya, tetapi kini terdapat sebuah vektor  $\mathbf{d}$  yang tegak lurus terhadap bidang kristal seperti ditunjukkan oleh Gambar I.10.



Gambar I.10 Berkas sinar-x menumbuk atom pada kisi (ilustrasi hukum Laue)

Misalkan sinar datang memiliki vektor gelombang  $\mathbf{k}$  sedangkan sinar pantulnya adalah  $\mathbf{k}'$ . Panjang gelombang sinar datang dan pantul pun sama besar. Akan tetapi, momentum partikel tidak konstan, tetapi energi hasil perbedaan tersebut diserap oleh kristal. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa:

$$\mathbf{k}' \cdot \mathbf{d} = -\mathbf{k} \cdot \mathbf{d} = kd \sin \theta$$

besaran  $kd \sin \theta$  disebut lintasan optik. Gelombang atas dan bawah akan mengalami interferensi konstruktif ketika beda fasenya adalah kelipatan  $2\pi$ . Dengan demikian, *hukum Laue* dinyatakan secara matematis sebagai berikut.

$$\Delta \mathbf{k} \cdot \mathbf{d} = 2\pi n \qquad \text{Pers. I.4}$$

## E. CACAT KRISTAL

Cacat kristal merupakan salah satu bukti tidak sempurnanya dalam struktur dan susunan atom pada kristal. Cacat kristal terbagi dalam beberapa jenis, dimana terdapat kecacatan pada struktur susunan atomnya. Cacat kristal ini mempunyai banyak pengaruh dalam menunjukkan sifat dari suatu material dan penggolongan cacat yang berguna dalam pemrosesan sebuah bahan. Contoh manfaat cacat kristal pada kehidupan nyata yaitu pembuatan gawai semikonduktor yang membutuhkan silikon murni dan cacat kristal tertentu.

### 1. Cacat Titik

Cacat titik adalah cacat paling sederhana yang dapat ditemukan dalam fase kristal apa pun. Kristal yang mengalami cacat titik terlokalisasi hingga memiliki satu lubang dari struktur kristal. *Pertama*, cacat titik karena adanya kekosongan atom dalam kristal. Saat temperatur atau suhu dari kristal berubah semakin tinggi, atom-atom akan bergetar karena menyerap panas dengan frekuensi tertentu. Hal tersebut dapat menyebabkan atom-atom dalam kristal keluar dari kisi atau lebih dikenal dengan *vacancy* atau cacat kekosongan. Pada kasus lain, kekosongan dapat menyebabkan difusi (transpor massa) atom semakin cepat. Saat temperatur semakin tinggi, maka akan atom akan semakin banyak pergi meninggalkan posisinya sehingga lubang (*hole*, muatan positif) atau

kekosongan pada sebuah kristal akan semakin banyak\*. **Kedua**, cacat titik interstisial, yaitu jenis cacat kristalografi titik di mana atom luar dari jenis yang sama atau berbeda, menempati kisi dalam struktur kristal. Meskipun atom tersebut menempati ruang interstisial kosong, ukuran atom biasanya lebih besar dari ruang kosong. Dengan demikian, atom di sekitarnya dikompresi dan terdistorsi. Kehadiran sejumlah besar atom interstisial dapat mengubah sifat mekanik dan termal dari zat padat. **Ketiga**, cacat Schottky, yakni cacat kristal karena kekosongan kation dan anion. Cacat ini timbul karena hilangnya satu kation dan satu anion pada kristal karena adanya pengaruh dari luar. Hal tersebut membuat kristal ion yang seharusnya muatan positifnya sama banyak dengan muatan negatif menjadi tidak stabil.

## 2. Cacat Dislokasi

Cacat dislokasi terjadi karena ada atom yang berada di tempat yang tidak semestinya pada kristal. Cacat dislokasi terbagi menjadi dislokasi tepi dan sekrup.

- a. Dislokasi tepi adalah cacat di mana setengah bidang dari atom berada di tengah kristal, sehingga mendistorsi bidang di dekat atom. Cacat ini menyebabkan bidang atom tetangganya membengkok. Oleh karena itu, bidang atom yang berdekatan tidak lurus dengan larik atom yang lain.
- b. Dislokasi sekrup menyebabkan bidang kisi bergeser satu lapis (atau lebih), seperti tangga spiral. Tidak seperti di dislokasi tepi, ketika kita memberikan tekanan pada kristal yang mengalami cacat ini, area dislokasi bergerak tegak lurus terhadap arah tegangan. Sebenarnya, dislokasi tepi

---

\* Anda mungkin belum memahami konsep mengenai *hole*, tetapi untuk saat ini kami hanya dapat memohon kepada Anda untuk mempercayai apa yang kami tulis. Anda akan mempelajari konsep lubang elektron pada BAB IV di subbab KONSEP LUBANG ELEKTRON (*HOLE*).

dan ulir hanyalah bentuk ekstrem dari kemungkinan struktur dislokasi yang dapat terjadi. Kebanyakan dislokasi pada kristal adalah gabungan dari keduanya. Dislokasi tersebut mempunyai banyak kontribusi terhadap deformasi plastis, karena dislokasi ini bisa bergerak saat atom yang berada di lapisan bawah tergeser oleh sebuah gaya yang diberikan pada bahan.

## **F. RANGKUMAN**

- Kristal merupakan suatu substansi dimana atom, molekul atau partikel terbungkus dengan lekat atau bergabung dengan cara tertentu dengan sebuah energi potensial yang bernilai kecil.
- Kisi kristal adalah saat dimana banyaknya partikel pada suatu kristal yang menyusun struktur kristal yang teratur pada sebuah bentuk tiga dimensi
- Simetri kristal dua dimensi, memiliki sifat yang memenuhi simetri translasi, simetri rotasi, dan simetri refleksi.
- Simetri kristal tiga dimensi memenuhi sifat translasi, inversi, refleksi, luncuran dan gabungan rotasi-translasi.
- Cacat kristal merupakan salah satu ketidaksempurnaan dalam struktur dan susunan atom pada kristal. Cacat kristal terbagi dalam beberapa jenis, dimana terdapat kecacatan pada struktur susunan atomnya
- Cacat kristal terbagi menjadi 3 berdasarkan jenisnya, yaitu cacat titik, cacat garis, dan cacar antarmuka.

## G. UJI KOMPETENSI

Kerjakanlah soal-soal berikut agar Anda dapat mengukur kemampuan Anda setelah mempelajari bab ini.

1. Garam meja biasa sebagian besar terdiri dari kristal NaCl. Dalam kristal NaCl, ada keluarga bidang yang terpisah 0,252 nm. Jika orde maksimum pertama diamati pada sudut datang  $18,1^\circ$ , berapakah panjang gelombang hamburan sinar-X dari kristal ini?
2. Berapa jumlah atom dalam unit sel primitif dari grafit?
3. Jelaskan perbedaan basis dan unit sel!
4. Jelaskan apa yang dimaksud dengan kristal tetragonal!
5. Tentukan panjang gelombang sinar-x hasil difraksi pada kristal garam batu jika panjang gelombangnya mula-mula bervariasi dari  $0,2 \text{ \AA} - 1 \text{ \AA}$  dan membentuk sudut  $9^\circ$  terhadap permukaan kristal ketika terjadi tumbukan ( $d = 2,814 \text{ \AA}$ ).

# BAB II

## DINAMIKA KISI

### A. GETARAN KISI

#### 1. Fonon

Pada sebarang temperatur di atas 0 K, atom-atom dalam kisi akan mulai bergetar terhadap titik kesetimbangannya dengan cara menyerap energi termal. Banyak sifat-sifat termal kristal yang terbentuk akibat getaran kisi. Dalam pendekatan harmonis, getaran ini diasumsikan memiliki amplitudo sangat kecil dibandingkan dengan jarak antar atom dan gaya interaksi antar atom (sehingga berlaku hukum Hooke). Analogi osilator harmonik juga berlaku pada getaran kisi. Jika pada osilator harmonik, kuantum pembawa energi disebut foton, maka dalam getaran kisi, kuantum pembawa energi termal zat padat disebut dengan *fonon*. Fonon dibedakan menjadi fonon akustik dan fonon optik. Hubungan antara energi fonon,  $E$ , frekuensi sudut,  $\omega$  dan vektor gelombang,  $\mathbf{k}$  adalah sebagai berikut.

$$E = \hbar\omega, \quad \omega = v_s k \qquad \text{Pers. II.1}$$

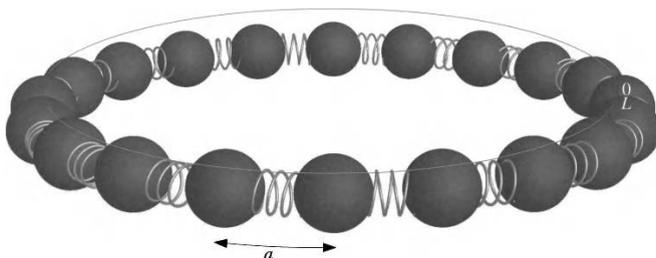
dimana  $v_s$  adalah kelajuan gelombang bunyi. Fonon termasuk partikel boson, sehingga memenuhi statistika Bose-Einstein.

Dalam sebuah kristal, fonon bukanlah partikel bebas. Fonon terikat pada kristal, sehingga nilai  $\hbar\mathbf{k}$  tidak menunjukkan momentum fonon sebagai partikel bebas, melainkan merujuk kepada momentum kristal. Teori dasar dari dinamika kisi diberikan oleh Born dan Huang yang mengemukakan teori kisi kristal dengan pendekatan kesimetrian translasi. Teori tersebut menggunakan pendekatan

Born-Oppenheimer, dimana elektron bergerak sangat cepat karena massanya lebih ringan, mengikuti gerak inti yang lebih lambat. Model yang lebih sederhana yang dapat digunakan untuk menjelaskan getaran kisi adalah model pegas. Gaya dari pegas sepanjang  $a$  dianalogikan sebagai interaksi antar atom (atau ion) yang berada pada ujung-ujungnya. Dalam subbab ini akan dibahas getaran kisi pada kisi satu dan dua dimensi secara ringkas.

## 2. Getaran Kisi Satu Dimensi Monoatom

Dalam kisi satu dimensi, untuk penyederhanaan, anggap terdapat sebuah rantai ion satu dimensi yang terdiri dari beberapa atom bermassa  $m$  berjarak masing-masing  $a$  dihubungkan dengan sebuah pegas dengan konstanta elastisitas  $k$ . Pada sistem ini terdapat  $N$  ion dengan panjang rantai  $L = Na$ .



Gambar II.1 Rantai ion/atom satu dimensi

Perpindahan atom di posisi ke- $r$  ke posisi atom sebelumnya memenuhi:

$$u_r = Ae^{i(kra - \omega t)} \quad \text{Pers. II.2}$$

Menurut hukum II Newton, gaya pemulih pada atom/ion ke- $r$  memenuhi

$$\begin{aligned} F_r &= ma_r \\ &= -m\omega^2 u_r \end{aligned}$$

sehingga,

$$\begin{aligned}
 F_r &= F_{\text{pegas}} \\
 -m\omega^2 u_r &= k(u_{r+1} - u_r) - k(u_r - u_{r-1}) \\
 \omega^2 &= \frac{k}{m} \left( 2 - \frac{u_{r+1}}{u_r} - \frac{u_{r-1}}{u_r} \right)
 \end{aligned}$$

selanjutnya, substitusikan ke Pers. II.2, sehingga diperoleh:

$$\omega^2 = \frac{4k}{m} \sin^2 \left( \frac{ka}{2} \right)$$

Dengan demikian, diperoleh hubungan dispersi dalam besaran frekuensi sudut, yakni:

$$\omega = \pm 2 \sqrt{\frac{k}{m}} \sin \left( \frac{ka}{2} \right) = \pm \omega_m \sin \left( \frac{ka}{2} \right) \quad \text{Pers. II.3}$$

Getaran ini memiliki dua karakteristik penting, yakni sebagai berikut.

- Untuk nilai  $k$  yang kecil,  $\omega$  sebanding dengan nilai mutlak dari  $k$ .
- Solusi persamaan perpindahan atom ( $u_r$ ) berulang periodik dengan periode  $2\pi/a$ .

Meskipun sebarang pola getaran dapat terjadi pada medium elastis, terdapat batasan mode-mode yang dapat dibedakan satu sama lain pada kisi dengan ukuran terbatas yang terbentuk dari atom-atom diskrit. Misalkan suatu rantai monoatom linier yang mengandung  $(N + 1)$  atom memiliki panjang  $Na$ . Anggap atom yang berada pada ujung-ujung rantai tersebut dijaga tetap, sehingga  $u_1 = u_{N+1} = 0$ . Mode getaran yang mungkin terjadi adalah:

$$k = \frac{\pi}{Na}, \frac{2\pi}{Na}, \dots$$

Untuk  $N$  yang sangat besar, maka keadaan yang berada antara  $k$  dan  $(k + dk)$  adalah  $(Na/\pi)dk$ . Dengan demikian,

banyaknya keadaan per satuan panjang untuk kristal satu dimensi adalah:

$$g(k) dk = \begin{cases} \frac{1}{\pi} dk, & k \leq \frac{\pi}{a} \\ = 0 & k > \frac{\pi}{a} \end{cases} \quad \text{Pers. II.4}$$

$g(k)$  disebut sebagai rapat keadaan (per satuan panjang, per satuan interval panjang gelombang  $k$ ). “Keadaan” disini menunjukkan banyaknya mode getaran yang dapat dibedakan.

### 3. Getaran Kisi Satu Dimensi Non-monoatom

Anggap satu rantai monoatom dengan dua ion/atom penyusun bermassa  $m_1$  dan  $m_2$  ( $m_1 < m_2$ ) yang masing-masing massa  $m_1$  (atau  $m_2$ ) terpisah sejauh  $a$ . Dalam hal ini, getarannya memiliki frekuensi sudut:

$$\omega = \sqrt{k} \sqrt{\frac{m_1 + m_2 \pm \sqrt{m_1^2 + 2m_1m_2 \cos ka + m_2^2}}{m_1m_2}} \quad \text{Pers. II.5}$$

Nilai  $\omega$  ini berkaitan dengan dua cabang fonon, yakni cabang optik dan akustik. Pada  $k$  yang kecil, masing-masing cabang muncul dalam nilai  $\omega$  berikut:

$$\omega_a(k) = \sqrt{\frac{k}{2(m_1 + m_2)}} ka \quad \text{Pers. II.6}$$

$$\omega_o(k) = \sqrt{\frac{2k(m_1 + m_2)}{m_1m_2}} \quad \text{Pers. II.7}$$

**Cabang akustik** terjadi pada tingkat energi yang lebih rendah dibandingkan cabang optik. Pada mode akustik, atom-atom yang saling bertetangga bergerak sefase, berbeda dengan mode optik. Di daerah cabang akustik, atom-atom  $m_1$  dan  $m_2$  beresilasi satu fase. Terdapat dua pengecualian pita akustik pada kisi monoatom, yakni sebagai berikut.

- a. Setiap kelompok perpindahan atom dapat digambarkan dalam bentuk vektor gelombang dengan nilai mutlak tidak lebih dari  $(\pi/2a)$ .
- b. Frekuensi sudut maksimum yang mungkin muncul pada mode getaran akustik adalah:

$$\omega_{a-\text{maks}} = \sqrt{\frac{2\hbar}{m_2}}$$

**Cabang optik** getaran kisi adalah jenis mode getaran yang memancarkan cahaya. Keadaan ini dapat terjadi ketika perbandingan amplitudo  $m_2$  dan  $m_1$  bernilai negatif serta keduanya berlawanan fase. Perbandingan massa atom  $m_2/m_1$  menunjukkan lebar daerah terlarang dan lebar cabang optik. Ketika massa kedua atom ini tidak jauh berbeda, daerah terlarang menjadi sempit dan daerah optik mencakup frekuensi hingga 1,4 kali lebih lebar. Akan tetapi, jika  $m_2$  cukup besar dibandingkan  $m_1$ , daerah terlarang menjadi lebih lebar, sedangkan cabang optik menjadi sempit dan berada pada frekuensi sudut:

$$\omega_{o-\text{min}} = \sqrt{\frac{2\hbar}{m_1}}$$

---

### **Pengayaan 2.1.** *Tinjauan kuantum untuk fonon*

---

Lihat Kittel, C. (2005). *Introduction to Solid State Physics*. John Wiley & Sons. h. 848.

Tinjauan yang diberikan pada subbab Getaran Kisi untuk fonon adalah tinjauan klasik. Akan tetapi, seperti yang telah disebutkan, fonon merupakan paket energi yang terkuantitasi. Energi fonon dengan frekuensi sudut  $\omega$  adalah:

$$E = \left( n + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega$$

dimana  $n$  adalah banyaknya fonon dan suku  $\hbar\omega/2$  menunjukkan titik nol energi mode getaran<sup>†</sup>. Tinjau sebanyak  $N$  partikel bermassa  $M$  terhubung dengan pegas dengan konstanta  $k$  dan panjang  $a$ . Dengan menggunakan model osilator harmonik, Hamiltonian sistem ini adalah:

$$H = \sum_{r=1}^n \left( \frac{1}{2M} p_r^2 + \frac{1}{2} k (q_{r+1} - q_r)^2 \right)$$

dimana perpindahan partikel ke- $r$  adalah  $q_r$  dan momentumnya adalah  $p_r$ . Persamaan gerak fonon satu dimensi dalam model ini dinyatakan dalam:

$$\ddot{Q}_k + \omega_k^2 Q_k = 0$$

dengan  $Q_k = N^{-1/2} \sum_r q_r \exp(-ikra)$ .

## B. KALOR JENIS ZAT PADAT

Kalor jenis adalah jumlah energi panas yang harus diberikan pada satu mol zat padat untuk meningkatkan suhunya satu derajat. Oleh karena itu, ketika suhu zat padat meningkat, maka energi dalamnya juga meningkat ketika diberikan energi panas. Peningkatan energi kinetik elektron bebas dan peningkatan jumlah getaran atom disekitar posisi

<sup>†</sup> Dalam mekanika kuantum, model “partikel dalam kotak” menunjukkan bahwa sebuah partikel tidak dapat memiliki total energi nol, meskipun dalam keadaan dasarnya. Hal ini juga berhubungan dengan ketidakpastian Heisenberg. Lihat Holgate, S. A. (2021). *Understanding Solid State Physics*. CRC Press. h. 344.

rata-ratanya adalah dua cara utama untuk melihat adanya kenaikan energi dalam. Secara umum, kalor jenis pada volume konstan didefinisikan sebagai berikut.

$$c_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V \quad \text{Pers. II.8}$$

Seperti telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, getaran kisi (fonon) akan mempengaruhi besaran-besaran termal kristal, salah satunya adalah kalor jenis. Kontribusi fonon terhadap kalor jenis suatu kristal disebut kalor jenis kisi dan dalam buku ini dinotasikan dengan  $c_l$ . Total energi fonon pada temperatur  $\tau = k_B T$  (dengan  $T$  adalah temperatur kristal) adalah:

$$U_l = \sum_k \sum_p U_{k,p} = \sum_k \sum_p \langle n_{k,p} \rangle \hbar \omega_{k,p} \quad \text{Pers. II.9}$$

dimana  $k$  adalah vektor gelombang,  $p$  adalah indeks polarisasi dan  $\langle n_{k,p} \rangle$  adalah okupansi kesetimbangan termal fonon yang memiliki vektor gelombang  $k$  dan polarisasi  $p$ .

Dalam perkembangannya, perhitungan kalor jenis zat mengalami beberapa koreksi. Model-model yang digunakan dalam penentuan kalor jenis zat diantaranya adalah model klasik, model Einstein dan model Debye. Penjelasan ringkas dari model-model tersebut adalah sebagai berikut.

### 1. Model Klasik

Misalkan suatu atom bermassa  $m$  sebagai salah satu pembentuk zat padat, melakukan gerak harmonik dengan amplitudo  $x_m$  pada frekuensi sudut  $\omega$ . Konstanta gaya pemulih adalah  $k$ . Pada setiap saat, perpindahan atom dari titik kesetimbangan adalah  $x$ , sehingga kecepatannya adalah  $v = \dot{x}$

dan percepatannya adalah  $\ddot{x} = -\omega^2 x$ . Total energi pada gerak atom ini adalah:

$$\begin{aligned} E &= E_k + E_p \\ &= \frac{m}{2}(v^2 + \omega^2 x^2) \end{aligned}$$

Berdasarkan teori klasik dan distribusi Boltzmann, nilai ekspektasi energi untuk atom tersebut adalah:

$$\langle E \rangle = kT \quad \text{Pers. II.10}$$

selanjutnya, untuk  $N$  atom, masing-masing dengan tiga derajat kebebasan akan memiliki total energi kisi sebesar:

$$U = 3NkT \quad \text{Pers. II.11}$$

Menurut teori klasik, *hukum Dulong-Petit* menyatakan bahwa pada volume tetap, suatu ensambel akan memiliki kalor jenis per mol sebesar

$$\begin{aligned} c_v &= \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = 3R = 3N_A k \\ &= 24,94 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \end{aligned} \quad \text{Pers. II.12}$$

Persamaan ini cocok untuk unsur dengan berat lebih dari 40 pada temperatur ruang dan temperatur tinggi, tetapi gagal pada temperatur rendah<sup>‡</sup>.

---

## **Pengayaan 2.2.** *Model klasik tentang energi rata-rata zat padat*

### *Model atom bebas*

---

<sup>‡</sup> Beberapa fakta percobaan, seperti pada beberapa logam elektropositif (misalnya Na, Cs, Ca, dan Mg) menunjukkan kenaikan kalor jenis di atas  $3R$  ketika temperatur mengalami peningkatan. Lihat Wahab, M. A. (2015). *Solid State Physics: Structure and Properties of Materials 3rd Edition*. Narosa Publishing House. h. 301.

Tinjau sebuah atom satu dimensi yang bergerak bebas tanpa pengaruh apa pun di sepanjang sumbu-x. Energi atom tersebut adalah:

$$E_x = \frac{p_x^2}{2m}$$

Misalkan  $f(E, T) = f$  adalah fungsi distribusi atom tersebut, maka rata-rata energi atom tersebut adalah

$$\langle E \rangle = \frac{\int E f d\tau}{\int f d\tau}$$

dimana  $d\tau$  adalah elemen volume ruang fase, untuk satu dimensi  $d\tau = dx dp_x$ . Untuk distribusi klasik (Maxwell-Boltzmann), nilai  $f$  adalah:

$$f = e^{-E/k_b T}$$

dengan demikian diperoleh:

$$\langle E \rangle = \frac{1}{2} k_B T$$

sehingga energi totalnya adalah:

$$E = N \langle E \rangle$$

### ***Model osilator harmonik klasik***

Pada zat pada satu dimensi, atom akan mengikuti gerak harmonik satu dimensi di sepanjang sumbu-x (misalnya). Jadi, energi atom ini adalah:

$$E = \frac{p_x^2}{2m} + \frac{1}{2} m\omega^2 x^2$$

Energi rata-rata atom tersebut adalah:

$$\langle E \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{p_x^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \right) e^{-\frac{1}{k_b T} \left( \frac{p_x^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \right)} dx dp_x}{\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{k_b T} \left( \frac{p_x^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \right)} dx dp_x}$$

$$= k_b T$$

Dengan demikian, energi total sistemnya sama dengan model yang telah dibahas sebelumnya, yakni:

$$E = N k_b T$$


---

## 2. Model Einstein

Einstein adalah orang pertama yang menyelesaikan masalah kalor jenis menggunakan teori kuantum Planck. Ia mengasumsikan bahwa zat padat terbangun atas  $N$  atom (per mol) akan dapat dianggap sebagai sebuah larik osilator atom yang bergetar dalam tiga arah yang saling bebas dengan frekuensi  $\nu$  (nu). Sebelumnya, telah dijelaskan bahwa sebuah kristal dapat dimodelkan memenuhi hukum Hooke, sehingga untuk total tiga arah gerakan (sumbu-x, y, z) akan terdapat  $3N$  osilator. Dengan demikian, total energi dalam kristal sama dengan rata-rata energi masing-masing osilator, sehingga:

$$\langle E \rangle = \frac{\sum_0^{\infty} \left( n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega \exp \left( -\frac{1}{k_b T} \left( n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega \right)}{\sum_0^{\infty} \exp \left( -\frac{1}{k_b T} \left( n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega \right)}$$

$$= \frac{\sum_0^{\infty} n \hbar \omega \exp \left( \frac{1}{k_b T} n \hbar \omega \right)}{\sum_0^{\infty} \exp \left( \frac{1}{k_b T} n \hbar \omega \right)} + \frac{1}{2} \hbar \omega$$

$$= \frac{n\hbar\omega}{\exp\left(\frac{n\hbar\omega}{k_bT} - 1\right)} + \frac{1}{2}\hbar\omega$$

selanjutnya, untuk masing-masing mode getaran, ekspektasi energinya adalah:

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar\omega}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_bT} - 1\right)} = \hbar\omega\langle n \rangle \quad \text{Pers. II.13}$$

nilai  $\langle n \rangle$  disebut sebagai okupansi fonon. Seringkali, nilai-nilai dalam Pers. II.13 dituliskan dalam besaran  $\beta_0$  dimana nilai ini setara dengan  $1/k_bT$  atau  $1/\tau$ . Dengan demikian, kalor jenis zat padat yang menggunakan model Einstein dapat dihitung dengan definisi pada Pers. II.8.

---

### **Pengayaan 2.3.** *Rapat keadaan*

Salah satu hal yang penting dalam getaran kisi adalah untuk menghitung distribusi frekuensi mode normal getaran. Spektrum dari frekuensi tersebut bersifat diskrit dan masing-masing frekuensi berhubungan dengan bilangan bulat  $n$ . Dengan demikian, mode getaran  $g(\omega)$  dalam interval frekuensi getaran  $d\omega$  secara rata-rata bernilai:

$$g(\omega) = dn$$

Ingat bahwa banyaknya getaran normal kisi kristal tiga dimensi adalah  $3N$ , dengan demikian:

$$\int_0 g(\omega) d\omega = 3N$$

Besaran  $g(\omega) d\omega$  disebut dengan ***rapat keadaan***. Rapat keadaan adalah banyaknya mode frekuensi (atau level energi dan lain sebagainya) per satuan jangkauan frekuensi tersebut per satuan volume.

---

### 3. Model Debye

Pada tahun 1912, Debye menemukan kesalahan pada asumsi yang dibuat oleh Einstein<sup>s</sup>. Menurutny, anggapan itu tidak dapat dibenarkan karena semua atom terkopel dengan pegas pada atom tetangganya. Selanjutnya, Debye menyederhanakan masalah tersebut dengan menganggap zat padat adalah sebuah medium getar yang kontinu.

Debye mengikuti Einstein yang memostulatkan bahwa suatu zat padat yang tersusun dari  $N$  atom akan memiliki mode getaran  $3N$ . Total energi getaran kisi dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini.

$$U = \int_0^{\omega_m} \frac{\hbar\omega \cdot g(\omega) d\omega}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1} \quad \text{Pers. II.14}$$

Persamaan tersebut sedikit sulit untuk diselesaikan, untuk itu Debye mengemukakan suatu pendekatan yang terkenal untuk menentukan kalor jenis zat padat pada temperatur rendah, yakni:

$$c_V = AT^m \quad (26)$$

dimana  $A$  adalah suatu konstanta dan  $T$  adalah temperatur zat padat. Nilai  $c_V$  ini seringkali pada kenyataannya sebanding dengan  $T^3$ . Parameter penting lain dari model Debye adalah kelajuan suara  $v$  dan frekuensi maksimum yang diharapkan,  $\omega_D$ . Hal lain yang bermanfaat dari model Debye adalah konsep *temperatur Debye*,  $\theta_D$ . Besaran ini didefinisikan sebagai:

---

<sup>s</sup> Yaitu bahwa semua osilator atom bergetar secara independen pada frekuensi konstan.

$$\theta_D = \frac{\hbar\omega_D}{k} = \frac{\hbar v}{k} \left( \frac{6\pi^2 N}{V} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Pers. II.15}$$

Fonon-fonon yang berada di atas temperatur Debye kebanyakan akan memiliki panjang gelombang beberapa jarak antar atomik saja. Akan tetapi, fonon yang berada di bawah temperatur Debye memiliki panjang gelombang di orde  $(a\theta_D/T)$ . Pada temperature sangat rendah dan  $T \ll \theta_D$ , berlaku pendekatan Debye  $T^3$  sebagai berikut.

$$c_V \approx \frac{12\pi^4}{5} Nk \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3 \approx 234Nk \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3 \quad \text{Pers. II.16}$$

---

### Contoh Soal 2. *Kalor jenis*

1. Tentukan frekuensi Debye suatu senyawa yang berada pada temperatur Debye 300 K.
2. Jika diketahui temperatur Debye untuk tembaga adalah 315 K, tentukan panas spesifik Debye zat tersebut pada temperatur 10 K dan 300 K.

#### Jawaban

1. Diketahui:

$$k = 1,38 \times 10^{-23}$$

$$\theta_D = 300$$

Ditanya:

$$\omega_D$$

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} \omega_D &= \frac{k\theta_D}{\hbar} = \frac{1,38 \times 10^{-23} \times 300}{1,055 \times 10^{-34}} \\ &= 3 \times 10^{13} \text{ Hz} \end{aligned}$$

2. Diketahui:

$$N = 6,023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$\theta_D = 315 \text{ K}$$

$$T_1 = 10 \text{ K}$$

$$T_2 = 300 \text{ K}$$

Ditanya:

$$c_{V,1} \text{ dan } c_{V,2}$$

Penyelesaian:

a. Untuk  $T_1 = 10 \text{ K}$

$$\begin{aligned} c_V &= 234Nk \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3 \\ &= 234(6,023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1})(1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \\ &\quad \text{/K}) \left( \frac{10 \text{ K}}{315 \text{ K}} \right)^3 \\ &= 234 \times 8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times (0,032)^3 \\ &= 0,0637 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

$\therefore$  Jadi, panas spesifik Debye untuk tembaga tersebut pada suhu 10 K adalah 0,637 J/(mol·K).

b. Untuk  $T_2 = 300 \text{ K}$

$$\begin{aligned} c_V &= 234Nk \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3 \\ &= 234(6,023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1})(1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \\ &\quad \text{/K}) \left( \frac{300 \text{ K}}{315 \text{ K}} \right)^3 \\ &= 234 \times 8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \times (0,952)^3 \\ &= 1677 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

$\therefore$  Jadi, panas spesifik Debye untuk tembaga tersebut pada suhu 300 K adalah 1677 J/(mol·K).

---

### C. EFEK ANHARMONIK

Sejauh ini, teori getaran kisi yang dibahas memiliki keterbatasan dimana energi potensialnya hanya sampai suku kuadrat terhadap perpindahan atomnya. Konsekuensinya adalah sebagai berikut.

1. Tidak ada dua gelombang kisi yang saling berinteraksi.
2. Tidak ada ekspansi termal.
3. Konstanta elastik adiabatik dan isothermal sama besar.
4. Konstanta elastik tidak bergantung pada tekanan dan temperatur.
5. Kapasitas kalor bernilai tetap pada temperatur tinggi.

Namun, kenyataannya, interaksi fonon mengandung suku-suku anharmonik (pangkat dua, tiga dan seterusnya). Dengan demikian, energinya dapat dituliskan dengan:

$$E_{p,r} = E_{p,r_0} + A(r - r_0)^2 + B(r - r_0)^3 + \dots$$

Suku-suku anharmonik ini membuat mode normal getaran kisi dapat berinteraksi satu sama lain. Interaksi tersebut dapat menyebabkan masing-masing mode bertukar energi dan mengubah arah perambatan gelombangnya. Ekspansi termal padatan, perubahan frekuensi mode normal terhadap suhu (atau parameter lain), resistivitas termal, perluasan puncak fonon dalam eksperimen hamburan neutron, dan transisi dari padat ke cair sebagai beberapa efek fisik anharmonisitas.

### D. KONDUKTIVITAS TERMAL

Konduktivitas termal adalah proses ketika kalor dipindahkan dari satu bagian ke bagian lain suatu sistem karena adanya gradien temperatur. Energi kalor mengalir pada kristal dengan memanfaatkan getaran fonon, foton, elektron bebas dan mode transmisi lainnya. Koefisien konduktivitas termal,  $\kappa$

(kappa) suatu zat padat didefinisikan terhadap aliran tunak kalor yang mengalir pada gradien (perbedaan) temperatur. Koefisien ini menunjukkan besarnya kemampuan bahan untuk menghantarkan panas.

Besarnya konduktivitas termal berbeda-beda untuk setiap unsur, paduan (aloi), atau senyawa dan didefinisikan oleh persamaan yang menghubungkan aliran panas dengan gradien termal yang dihasilkan, yakni:

$$\mathbf{q} = -\kappa \nabla T \quad \text{Pers. II.17}$$

dimana  $\mathbf{q}$  adalah fluks aliran energi kalor atau energi yang dialirkan per satuan luas penampang per satuan waktu. Bentuk penyederhanaan satu dimensional pada persamaan di atas adalah dengan mengganti  $\nabla T$  menjadi  $dT/dx$ . Bentuk ini menyiratkan bahwa proses transfer energi panas merupakan sebuah proses acak. Energi tidak hanya memasuki salah satu ujung bahan kemudian berjalan secara langsung (balistik) lurus ke ujung lainnya, tetapi berdifusi di sepanjang bahan dan seringkali mengalami tumbukan. Jika energi merambat lurus, maka persamaan  $\mathbf{q}$  tidak akan bergantung pada gradien temperatur, tetapi hanya selisih temperatur awal dan akhir.

Koefisien konduktivitas memiliki sifat yang unik. Pada konduktor logam, panas dibawa oleh elektron bebas, sedangkan pada insulator, kebanyakan dibawa oleh fonon. Oleh karena itu, secara umum konduktivitas termal total dapat dituliskan dengan:

$$\kappa = \kappa_e + \kappa_p$$

dimana  $\kappa_e$  adalah koefisien konduktivitas yang disebabkan oleh elektron dan  $\kappa_p$  disebabkan oleh fonon. Nilai  $\kappa_e$  dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\kappa_e = \left( \frac{\pi^2 N k_b^2 \tau}{3m} \right) T \quad \text{Pers. II.18}$$

dengan  $\tau$  adalah waktu bebas rata-rata. Adapun efek fonon dalam  $\kappa_p$  pada insulator berbanding lurus dengan  $T^3$  (seperti hukum Debye) pada temperatur rendah. Pada temperatur tinggi ( $T \gg \theta_D$ ), nilai  $\kappa_p$  sebanding dengan  $T^{-1}$ .

## E. RANGKUMAN

Keseluruhan materi dalam bab ini dapat dirangkum secara sederhana sebagai berikut.

- Fonon dibedakan menjadi fonon akustik dan fonon optik.
- Getaran satu dimensi memiliki dua karakteristik penting, yakni untuk nilai  $k$  yang kecil,  $\omega$  sebanding dengan nilai mutlak dari  $k$ .
- Menurut teori klasik, hukum Dulong-Petit menyatakan bahwa pada volume tetap, suatu ensambel akan memiliki kalor jenis per mol sebesar 24,94 J/mol.K.
- Kapasitas kalor klasik cocok untuk zat padat pada temperatur ruang dan temperatur tinggi, tetapi gagal pada temperatur rendah.
- Zat padat dengan  $N$  atom akan memiliki mode getaran sebanyak  $3N$  dengan frekuensi yang sama berdasarkan teori Einstein dan Debye
- Teori Debye mengemukakan suatu pendekatan yang terkenal untuk menentukan kalor jenis zat padat pada temperatur rendah

$$C_V = AT^m$$

- Koefisien konduktivitas termal,  $\kappa$  suatu zat padat didefinisikan terhadap aliran tunak kalor yang mengalir pada gradien (perbedaan) temperatur.

## F. UJI KOMPETENSI

Kerjakanlah soal-soal berikut agar Anda dapat mengukur kemampuan Anda setelah mempelajari bab ini.

1. Sebuah kisi tersusun atas atom yang bermassa  $m$  dan  $3m$ . Tentukan perbandingan frekuensi mode akustik maksimum terhadap frekuensi tersempit mode optik yang muncul dalam kisi tersebut.
2. Tunjukkan bahwa pada rantai kisi monoatom berlaku hubungan dispersi berikut.

$$\omega^2 = \frac{4\hbar}{m} \sin^2\left(\frac{ka}{2}\right)$$

3. Pada beberapa permasalahan, sangat berguna apabila rapat keadaan dinyatakan dalam besaran frekuensi sudut atau  $g(\omega)$ . Buktikan bahwa untuk kisi monoatom,

$$g(\omega) = \frac{1}{\pi a} \left[ \sqrt{\frac{\hbar}{m} \cos\left(\frac{ka}{2}\right)} \right]^{-1}$$

4. Jelaskan apa yang dimaksud dengan mode optik dan mode akustik fonon.
5. Dengan menggunakan definisi,

$$c_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V$$

Tentukan persamaan kalor jenis kisi berdasarkan model Einstein.

## **BAB III**

# **ELEKTRON DALAM LOGAM**

### **A. SIFAT KHAS LOGAM**

Logam menjadi material yang paling dibutuhkan baik karena banyak diterapkan di berbagai sektor baik itu industri, perkantoran, dan pertukangan. Logam sendiri juga memiliki nilai relatif yang cenderung tinggi dan mempunyai sifat yang elastis. Logam akan menjadi kuat dengan cara melelehkan logam dengan menggunakan suhu tertentu sesuai dengan titik didih dari material logam yang ingin dilelehkan. Material logam yaitu suatu bagian dari unsur kimia yang mana bisa bersifat seperti: kuat, solid, bisa menghantarkan arus listrik dan menghantarkan panas, juga memiliki titik cair yang relatif tinggi.

Salah satu cara memperoleh bijih logam adalah dengan penambangan yang tentunya masih berupa bahan mentah yang diperoleh dari keadaan murni seperti emas, emas putih, platina, bismut, serta bisa diperoleh dengan yang bercampur dengan unsur lain seperti sulfur (S), silikon (Si), fosfor (F) karbon (C), serta sesuatu yang bisa diamati disekitar seperti pasir, tanah liat. Biji dari suatu unsur logam mentah yang diperoleh dari hasil pertambangan pastinya akan diproses terlebih dahulu sebelum diolah menjadi logam yang siap pakai pengolahan dari logam dilakukan dengan cara yaitu dipecah dari yang asalnya bongkahan, dan memilih dari bongkahan tersebut unsur logamnya, lalu akan di bersihkan dengan air hal ini digunakan untuk menghilangkan bagian yang tidak diperlukan serta yang terakhir akan dikeringkan dengan

memanggang logam tersebut hal ini dilakukan untuk mengeluarkan air yang terkandung pada logam. Selain dari logam ada beberapa penyebutan dari unsur yang selain logam yaitu non logam dan unsur metaloid (yang mirip dengan logam).

Logam dapat dibagi dalam beberapa golongan, yaitu:

1. Logam berat: merupakan logam yang memiliki kerapatan massa lebih dari  $5,0 \text{ g/cm}^3$ , logam berat bisa mengakibatkan kanker jika terlalu banyak terkandung di dalam badan. Adapun macam-macam logam berat yaitu: seng (Zn), besi (Fe), nikel (Ni), krom (Cr), timah putih dan timah hitam (Sn), tembaga (Cu).
2. Logam ringan: merupakan logam yang memiliki kerapatan massa kurang dari  $5,0 \text{ g/cm}^3$ . Adapun macam-macam dari logam ringan seperti: barium (Ba), kalium (K), aluminium (Al), magnesium (Mg), titanium (Ti), kalsium (Ca).
3. Logam mulia: logam mulia merupakan logam yang nilai jualnya cenderung tinggi dan dianggap berharga. Logam mulia juga mempunyai sifat yang anti korosi dan tidak bisa teroksidasi adapun macam-macam dari logam murni seperti: emas (Au), perak (Ag) dan platina (Pt).
4. Logam tahan api: zirkonium (Zr), tungsten (W), molibden (Mo), titanium (Ti).

Logam dan bahan campurannya biasanya digunakan untuk berbagai keperluan seperti untuk bahan konstruksi mesin, kendaraan bermotor, kapal dan lain-lain, Karakteristik-karakteristik logam yang penting ialah sifat mekanis, fisik, dan kimia. Berikut ini adalah karakteristik-karakteristik dari logam:

1. *Sifat mekanik*, merupakan sifat mekanis dari unsur logam yang artinya kemampuan dari logam agar bisa menahan beban, baik itu beban diam maupun beban dinamis yang berlaku di suhu ruangan, adapun pada suhu yang relatif

tinggi dan suhu yang di bawah  $0^{\circ}\text{C}$ . Beban statis merupakan beban yang konstan yang artinya beban dalam posisi yang stabil, berat dan arahnya tidak akan berubah seiring bertambahnya waktu. Sifat mekanis logam yaitu kekuatan dari logam, kepadatan logam, lentur (jika dipanaskan pada suhu tertentu), tahan aus dll.

2. *Sifat fisik*, merupakan suatu kejadian yang mana hal tersebut dipengaruhi dari hukum fisika yaitu seperti pengaruh dari panas dan listrik
  - a. Sifat yang disebabkan dari pengaruh panas yaitu mencair, ukuran yang memuai yang disebabkan panas.
  - b. Sifat listrik yang umum dijumpai ialah tahanan dari logam terhadap aliran arus listrik ataupun sebaliknya atau bisa disebut sebagai daya hantar kelistrikan.
3. *Sifat kimia*, merupakan karakteristik bahan logam yang terdiri dari kelarutan bahan yang ada pada larutan basa maupun garam, juga hasil dari oksidasi bahan.

## **B. TEORI-TOERI ELEKTRON PADA LOGAM**

Logam padatan tersusun atas larik-larik atom dan masing-masing atom memiliki inti dengan elektron yang bebas bergerak mengelilinginya. Elektron yang berada paling luar disebut elektron valensi dan mengalami gaya tarik terlemah terhadap inti atom. Pada logam sederhana seringkali diasumsikan bahwa potensial total logam adalah nol. Dengan demikian, elektron konduksi menerima potensial nol dan bebas bergerak dimanapun dalam logam. Model pendekatan inilah yang disebut sebagai *teori elektron bebas*.

### **1. Teori Drude**

Paul Drude, pada tahun 1900-an mencoba untuk menjelaskan sifat-sifat dasar dari model elektron bebas. Teori ini dikenal sebagai teori elektron bebas versi klasik. Model

elektron bebas klasik terhadap logam dapat mengambil asumsi sebagai berikut:

- a. Pada suatu kristal diilustrasikan menjadi superposisi pada suatu posisi suatu ion positif (yang akan berbentuk suatu kristalin) serta elektron yang akan bergerak bebas pada suatu volume yang berbentuk kristal.
- b. Suatu elektron bebas bisa disebut sebagai suatu gas, yang mana pada setiap elektron tersebut akan bergerak secara random pada kecepatan yang termal (yakni hampir seperti gas ideal).
- c. Akan berpengaruh ke dalam medan potensial ion yang akan diabaikan hal ini disebabkan EK(energi kinetik) pada elektron bebas sangatlah besar dari pada semestinya.
- d. Elektron akan bergerak hanya pada keadaan kristal hal ini disebabkan karena ada suatu penghalang (*barrier*) potensial yang berupa pada permukaan batas dari kristal.

Asumsi-asumsi dalam model yang dikemukakan oleh Drude ini menyebabkan model ini memiliki kekurangan, yakni elektron bebas bergerak di seluruh logam dalam arah acak. Hal ini menyebabkan elektron dapat bertabrakan satu sama lain atau dengan ion positif tetap di kisi kristal. Selain itu, model ini sama sekali tidak memperhitungkan salah satu detail interaksi elektrostatis antara elektron atau elektron dan ion. Akan tetapi, disamping keterbatasannya, model Drude mampu memprediksi dengan tepat benda mana yang dapat menghantarkan panas atau listrik. Selain itu, model Drude juga mampu menjelaskan hubungan hukum Ohm yang selama ini dikenal.

Model Drude dapat digunakan sebagai dasar dalam perhitungan konduktivitas termal ( $\kappa$ ) dan konduktivitas listrik ( $\sigma$ ) pada logam. Secara matematis, nilai  $\kappa$  dan  $\sigma$  dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\kappa = \frac{1}{2} n v k_b \lambda \quad \text{dan} \quad \sigma = \frac{n e^2 \tau}{m} \quad \text{Pers. III.1}$$

dimana  $v$  adalah rata-rata kecepatan gerak elektron,  $\lambda$  jarak bebas rata-rata elektron,  $\tau$  waktu tumbukan rata-rata elektron.

## 2. Hukum Wiedemann-Franz

Menurut Wiedemann dan Franz, perbandingan konduktivitas termal,  $\kappa$  terhadap konduktivitas listrik,  $\sigma$  sebanding dengan temperatur absolut bahan. Secara matematis dinyatakan dengan:

$$\frac{\kappa}{\sigma} = \left( \frac{\pi^2 k_b^2}{3 e^2} \right) T = LT \quad \text{Pers. III.2}$$

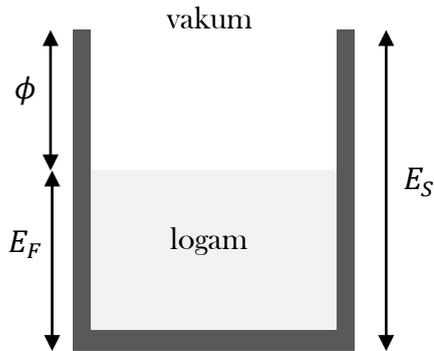
dengan  $L$  adalah konstanta Lorentz. Lorentz mengamati bahwa nilai  $L$  selalu konstan, yakni  $1,11 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega/\text{K}^2$ . Dengan menggunakan nilai eksperimental (untuk konduktivitas listrik dan untuk konduktivitas termal elektron), peneliti menemukan bahwa memang rasio Lorentz kira-kira bernilai sama untuk sejumlah logam. Meskipun demikian, konstanta itu sekitar dua kali lipat dari yang diturunkan dari teori Drude.

## 3. Teori Sommerfeld

Sommerfeld adalah orang yang memodifikasi teori Drude dengan menggunakan mekanika kuantum. Dalam teori ini, elektron dipandang sebagai partikel fermion menggunakan fungsi Fermi-Dirac. Asumsi dalam teori Sommerfeld adalah sebagai berikut.

- a. Sejumlah banyak elektron konduksi dalam logam tidak sepenuhnya bebas bergerak karena terikat pada logam. Untuk menjelaskan hal ini, bayangkan sebuah kotak potensial sedalam  $E_S$ , dimana nilai ini juga menunjukkan

selisih energi elektron di dasar logam dan pada ruang vakum.



Gambar III.1 Sebuah kotak potensial yang terisi logam

Pada temperatur  $T = 0 \text{ K}$ , seluruh tingkat energi sampai  $E_F$  (energi Fermi) penuh, sedangkan di atasnya kosong. Nilai  $\phi$  disebut fungsi kerja logam dan menunjukkan kerja yang diperlukan untuk mengeluarkan sebuah elektron dari dalam logam. Dengan menggunakan Gambar III.1, diperoleh bahwa:

$$\phi = E_S - E_F \quad \text{Pers. III.3}$$

- b. Gaya antara elektron konduksi dan inti ion diabaikan, sehingga elektron di dalam logam diperlakukan sebagai elektron bebas. Energi total elektron sepenuhnya adalah energi kinetik (EK) karena energi potensial dapat diabaikan (disebabkan oleh massa elektron yang sangat kecil).
- c. Massa elektron sangat kecil dalam kerapatan logam, sehingga dapat dianggap sebagai gas yang berada dalam kompresi sangat tinggi (gas terdegenerasi). Terlebih-lebih, jika gas ini diberi muatan, elektron bebas dalam logam dapat dianggap sebagai plasma yang sangat rapat.

- d. Elektron-elektron dalam logam diasumsikan memenuhi prinsip larangan Pauli, sehingga memenuhi statistika Fermi-Dirac.

---

**Pengayaan 3.1. *Distribusi Fermi-Dirac***

Misalkan  $G(E) dE$  adalah banyaknya keadaan kuantum yang ada dalam interval energi  $E$  dan  $E + dE$ , maka konsentrasi elektron pada rentang energi  $dE$  adalah:

$$dN = N(E) dE = f(E) G(E) dE$$

dimana  $N(E)$  adalah fungsi distribusi elektron dan  $f(E)$  adalah fungsi distribusi Fermi-Dirac. Dengan demikian, kerapatan energi pada rentang  $E$  hingga  $E + dE$  adalah:

$$g(E) dE = \frac{G(E)}{V} dE = \frac{4\pi}{h^3} (2m)^{3/2} E^{1/2} dE$$

Adapun nilai  $f(E)$  dinyatakan dalam  $E_F$  (energi fermi), yakni:

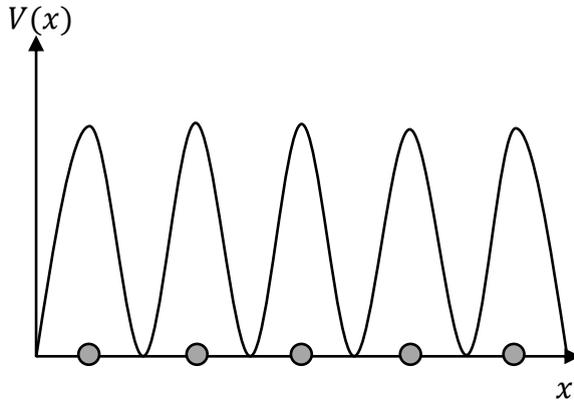
$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_b T}} + 1}$$

---

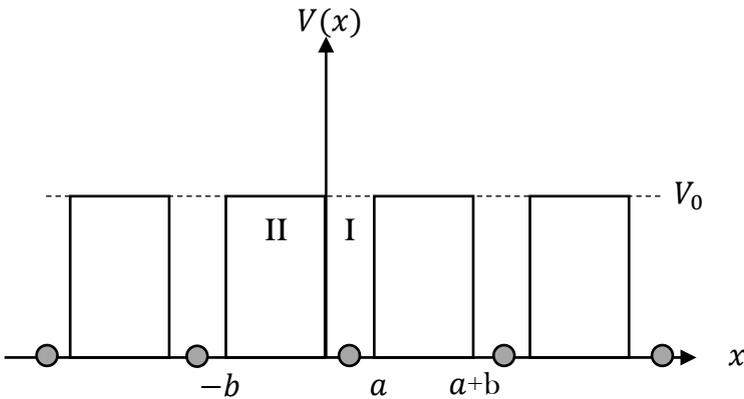
## C. TEORI PITA ZAT PADAT

### 1. Model Kronig-Penney

Teori elektron bebas mengasumsikan elektron bergerak dalam daerah yang memiliki potensial konstan. Teori ini gagal menjelaskan kenapa sebagian bahan bersifat konduktor listrik yang baik dan sebagian lainnya tidak. Sifat variatif dari konduktivitas listrik ini dipelajari oleh Kronig dan Penney dalam model satu dimensi. Berdasarkan model ini, elektron bergerak dalam pengaruh potensial yang berubah-ubah.



Gambar III.2 Gerak elektron dalam potensial periodik pada kisi kristal



Gambar III.3 Model Kronig Penney

Gambar III.3 menunjukkan sumur potensial yang berulang pada periode  $(a + b)$  dan memenuhi kondisi berikut.

$$V(x) = 0, \text{ untuk } 0 < x < a$$

$$V(x) = V_0, \text{ untuk } -b < x < 0$$

Dengan demikian, gelombang Schrodinger yang bersesuaian untuk daerah I dan II adalah:

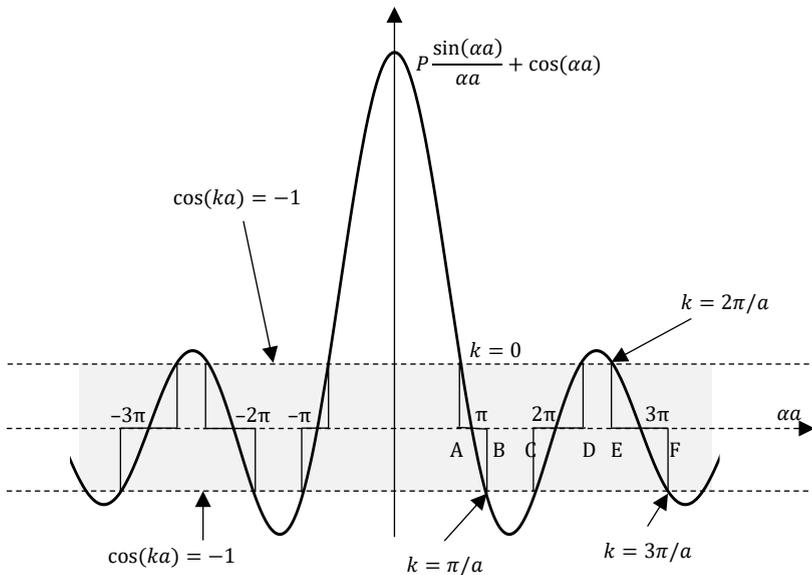
$$\Psi_I = Ae^{iax} + Be^{-iax}$$

$$\Psi_{II} = Ce^{\beta x} + De^{-\beta x}$$

dengan  $\alpha = (2mE/\hbar^2)^{1/2}$  dan  $\beta = (2m[V_0 - E]/\hbar^2)^{1/2}$ . Kronig dan Penney memperoleh persamaan untuk modelnya, yakni sebagai berikut.

$$P \frac{\sin(\alpha a)}{\alpha a} + \cos(\alpha a) = \cos(ka) \quad \text{Pers. III.4}$$

dengan  $P = (ma/\hbar^2)(V_0 b)$ . Nilai  $P$  sebanding dengan luas  $V_0 b$  dari penghalang potensial selebar  $b$  dan setinggi  $V_0$ . Nilai  $P$  ini juga menunjukkan bahwa ikatan elektron lebih kuat daripada sumur potensial. Plot grafik Pers. III.4 untuk nilai  $P = 3\pi/2$  dan  $\cos(ka)$  mulai dari  $-1$  ke  $1$  disajikan dalam gambar berikut.



Gambar III.4 Grafik persamaan model Kronig-Penney untuk  $P = 3\pi/2$

Grafik tersebut menunjukkan batas daerah energi yang diperbolehkan, yaitu AB, CD, EF dan seterusnya. Teori Kronig dan Penney memiliki kesimpulan sebagai berikut.

- a. Spektrum energi elektron tersusun atas sejumlah pita energi yang diperbolehkan dan masing-masing terpisah dengan daerah terlarang.
- b. Lebar daerah yang diperbolehkan meningkat seiring meningkatnya  $\alpha a$ .
- c. Lebar daerah yang diperbolehkan menurun ketika  $P$  meningkat.

## 2. Teorema Bloch-Floquet

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, elektron yang bergerak pada potensial  $V_0$  memenuhi persamaan gelombang Schrodinger. Jika elektron bergerak dalam pengaruh potensial periodik  $V(x)$ , maka persamaan gelombang yang bersesuaian adalah:

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} [E - V(x)]\Psi = 0 \quad \text{Pers. III.5}$$

Jika gelombang tersebut berada pada kisi kristal dengan konstanta  $a$  (jarak dari atom ke atom), maka berlaku:

$$V(x) = V(x + a)$$

Berdasarkan teorema Bloch (disebut pula teorema Floquet), solusi dari Pers. III.5 adalah:

$$\Psi = u_k(x) e^{\pm ikx} \quad \text{Pers. III.6}$$

---

AB, CD, EF dan titik yang mengikuti pola ini adalah pita daerah yang diperbolehkan (*allowed zone*).

dengan  $u_k(x) = u_k(x + a)$ . Selanjutnya, Pers. III.6 disebut dengan *fungsi Bloch*.

### 3. Pita Brillouin

Pita Brillouin atau zona Brillouin menunjukkan daerah terlarang. Perhatikan kembali Gambar III.4. Pada kisi satu dimensi, daerah yang diperbolehkan berada pada titik AB, CD, EF dan titik yang sama pada daerah negatif, anggaplah  $-(AB)$ ,  $-(BC)$ , dan  $-(EF)$ . Daerah tersebut berada pada nilai-nilai bilangan gelombang berikut.

$$k = \pm \frac{n\pi}{a}$$

dimana  $n = 1, 2, 3 \dots$  Selanjutnya, daerah diantara titik  $-k$  hingga ke  $k$  untuk  $n$  yang sama disebut sebagai daerah Brillouin ke- $n$ . Pada kisi dua dimensi, nilai-nilai yang diperbolehkan berada pada:

$$n_1 k_x + n_2 k_y = \frac{\pi}{a} (n_1^2 + n_2^2)$$

Adapun pada tiga dimensi, hanya perlu menambahkan suku  $+n_3 k_z$  pada ruas kiri dan  $+\pi(n_3^2)/a$  pada ruas kanan persamaan tersebut.

## D. DINAMIKA GERAK ELEKTRON

### 1. Kecepatan Grup

Misalkan sebuah paket elektron memiliki vektor gelombang  $\mathbf{k}$  dan energi  $E_{\mathbf{k}}$ , maka kecepatan grup paket gelombang tersebut sama dengan kecepatan elektron adalah:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_g = \frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{k}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{k}} \left( \frac{E_{\mathbf{k}}}{\hbar} \right) = \frac{1}{\hbar} \nabla_{\mathbf{k}} E_{\mathbf{k}} \quad \text{Pers. III.7}$$

Pada elektron bebas bergerak pada satu sumbu dan memiliki energi  $p^2/2m$ , maka kecepatan grupnya adalah:

$$v_g = \frac{1}{\hbar} \frac{dE_k}{dt} = \frac{p}{m}$$

Hal yang ingin kami sampaikan adalah sampai beberapa pembahasan selanjutnya, nilai  $E_k$  menunjukkan energi gelombang yang memiliki vektor gelombang  $\mathbf{k}$ .

## 2. Massa Efektif Elektron

Jika gerak elektron berada dalam pengaruh potensial periodik, maka massa elektron juga akan berubah-ubah. Massa elektron dibawah pengaruh perubahan medan listrik disebut sebagai *massa efektif elektron* ( $m^*$ ). Anggap terdapat sebuah gelombang elektron yang bergerak pada kisi yang dipengaruhi medan listrik  $\mathbf{E}_L$  (hanya untuk subbab ini kami menggunakan notasi ini untuk membedakan medan listrik dan energi). Usaha yang diperlukan elektron selama waktu  $dt$  untuk melawan pengaruh medan listrik adalah:

$$\begin{aligned} dE &= -F ds \\ &= -F v dt \\ &= -eE_L \left( \frac{dx}{dt} \right) dt \\ &= -eE_L \cdot v_g \cdot dt \\ &= -eE_L \left( \frac{1}{\hbar} \frac{dE_k}{dk} \right) dt \\ dk &= -\frac{eE_L}{\hbar} dt \end{aligned}$$

Selanjutnya, berdasarkan konsep percepatan diperoleh:

$$\begin{aligned} a &= \frac{dv}{dt} \\ &= \frac{d}{dt} \left( \frac{dE_k}{dk} \right) \\ &= \frac{1}{\hbar} \left( \frac{d^2 E_k}{dk^2} \left( -\frac{eE_L}{\hbar} \right) \right) \end{aligned}$$

$$= -\frac{eE_L}{\hbar^2} \frac{d^2 E_k}{dk^2}$$

Menurut hukum II Newton,  $F = ma$ , tetapi sekarang kita juga mempunyai  $-eE_L$ . Dengan menyamakan kedua hal tersebut dan mengubah  $m$  menjadi  $m^*$  diperoleh:

$$m^* = \hbar^2 \frac{dk^2}{dE_k} \quad \text{Pers. III.8}$$

Perbandingan  $m$  (massa elektron) terhadap massa efektifnya menunjukkan faktor seberapa besar tingkat elektron dalam keadaan  $k$  berperilaku seperti elektron bebas,  $f_k$ . Jika  $f_k = 1$ , maka elektron berperilaku sepenuhnya seperti elektron bebas.

---

**Contoh Soal 3.** *Massa efektif elektron*

Suatu kristal memiliki energi disekitar ujung pita valensi sebesar  $E = -Ck^2$  dimana  $C = 10^{-39} \text{ Jm}^2$ . Sebuah elektron dengan besar vektor gelombang  $k = 10^{10} / \text{m}$  tereksitasi dari orbital tertentu untuk memenuhi pita valensi tersebut. Tentukan massa efektif muatan positif di tempat elektron tersebut tereksitasi.

**Jawaban**

Diketahui:

$$E = -Ck^2$$

$$C = 10^{-39} \text{ Jm}^2$$

$$k = 10^{10} / \text{m}$$

Ditanya:

$$m^*$$

Penyelesaian:

$$\begin{aligned} m^* &= \hbar^2 \left( \frac{dk^2}{d^2E} \right) \\ &= \frac{\hbar^2}{\frac{d^2E}{dk^2}} \\ &= \frac{\hbar^2}{-2Ck} \\ &= -\frac{1}{2(10^{-39})(10^{10})} \hbar^2 \\ &= 5 \times 10^{-30} \hbar^2 \\ &= -5,5 \times 10^{-30} \text{ kg} \end{aligned}$$

Nilai  $m^*$  di atas adalah massa efektif elektron yang keluar dari orbitalnya. Akan tetapi, massa ini sama dengan massa muatan positif (*hole*) yang menempati tempat elektron tersebut.

---

### **Pengayaan 3.2.** *Prinsip Pauli dan Energi Fermi*

Menurut teori kuantum elektron bebas, tingkat energi elektron dinyatakan dengan:

$$E = \frac{\hbar^2}{2m} \mathbf{k}^2 = \frac{2\pi^2 \hbar^2}{m} \left[ \left( \frac{n_x}{L_x} \right)^2 + \left( \frac{n_y}{L_y} \right)^2 + \left( \frac{n_z}{L_z} \right)^2 \right]$$

dimana  $L$  adalah panjang rusuk kotak tempat elektron berada dan  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  Dalam mekanika kuantum, terdapat suatu prinsip dasar yang disebut dengan ***Prinsip Pauli***. Prinsip ini menyatakan bahwa: *seperti tingkat elektron dalam atom, masing-masing partikel energi  $E$  dapat membawa maksimal dua elektron dengan spin yang berlawanan.* Tingkat energi paling atas disebut sebagai ***tingkatan Fermi*** dan energinya sendiri disebut sebagai ***energi Fermi***,  $E_F$ .

Tingkatan (level) Fermi sendiri memiliki beberapa karakteristik, yakni sebagai berikut.

1.  $E_F$  adalah tingkat energi teratas pada konduktor di temperatur 0 K. Artinya,  $E_F$  adalah energi maksimum dari elektron logam pada temperatur 0 K. Pada 0 K, energi Ferminya adalah:

$$E_F = \frac{h^2}{2m} \left( \frac{3n}{8\pi} \right)^{2/3}$$

2.  $E_F$  adalah energi rata-rata yang dilepaskan elektron dalam peristiwa konduksi listrik.
  3.  $E_F$  berfungsi sebagai acuan tingkatan karena dalam logam terisi penuh.
  4. Saat temperatur logam meningkat, hanya sebagian level yang berada disekitar  $E_F$  yang akan berubah. Beberapa level dibawah  $E_F$  akan kosong dan di atasnya akan terisi oleh elektron.
  5.  $E_F$  berada pada daerah terlarang pada semikonduktor dan insulator. Pada keadaan ini,  $E_F$  tidak terisi dan pada semikonduktor keterisian tingkatan Fermi adalah 1/2.
- 

## E. SUPERKONDUKTIVITAS

Salah satu sifat yang tidak biasa dari zat padat adalah beberapa padatan dan aloi mampu memiliki resistivitas listrik hampir nol (konduktivitasnya sangat besar). Keadaan ini sering disebut dengan *superkonduktivitas* dan pertama kali diamati oleh H. K. Onnes pada 1911 ketika melakukan pengukuran konduktivitas listrik logam pada suhu rendah. Dikemudian hari, fenomena ini ditemukan pula pada Pb, Sn, Zn, Al dan logam lainnya. Tidak ada kriteria umum untuk menentukan suatu bahan adalah superkonduktor atau bukan. Sifat superkonduktor dapat berubah dengan memvariasikan suhu, medan magnet, tegangan, pengotor, struktur atom, ukuran, frekuensi eksitasi medan listrik terapan, dan massa isotop.

Superkonduktor banyak dimanfaatkan pada berbagai bidang, misalnya pada bidang transportasi yang menggunakan efek Meissner yang diangkat oleh magnet superkonduktor. Adapun penerapannya seperti pada kereta api super cepat yang terdapat di Kota Jepang bernama *The Yamanashi MLX01 Maglev Train*. Kereta api tersebut dapat mengudara pada magnet bagian atas superkonduktor, sehingga roda saling bergesekan dengan rel dan bisa dimusnahkan serta mengakibatkan kereta api melintas cepat.

Selanjutnya, adanya *Magnetic Resonance Imaging (MRI)* yang sering dimanfaatkan pada bidang kedokteran. *MRI* ini memanfaatkan medan magnet dan gelombang radio, sehingga aman digunakan. Kemudian, *Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)* dimanfaatkan untuk mendeteksi medan magnet yang sangat kecil dan digunakan untuk mencari minyak ataupun mineral. Disamping itu, dalam bidang kelistrikan, terdapat kabel superkonduktor dengan nitrogen pendingin guna mengalihkan adanya kabel listrik yang tersusun dari tembaga pada bagian bawah tanah. Dengan, memanfaatkan kabel listrik superkonduktor, arus akan di transmisikan jauh lebih meningkat.

Terakhir, superkonduktor dimanfaatkan juga pada bidang komputer yaitu adanya komputer yang menggunakan *device* superkonduktor. Kemudian, dalam tenaga baterai yaitu *Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)*. *SMES* ini adalah tambahan peralatan kontroler yang memiliki fungsi dalam meredam daya osilasi dalam bidang kelistrikan.

## F. RANGKUMAN

Keseluruhan materi dalam bab ini dapat dirangkum secara sederhana sebagai berikut:

- Material logam yaitu suatu bagian dari unsur kimia yang mana bisa bersifat seperti: kuat, solid, bisa menghantarkan arus listrik dan menghantarkan panas, juga memiliki titik cair yang relatif tinggi.
- Salah satu cara memperoleh bijih logam adalah dengan penambangan yang tentunya masih berupa bahan mentah yang diperoleh dari keadaan murni seperti emas, emas putih, platina, bismut, serta bisa diperoleh dengan yang bercampur dengan unsur lain seperti sulfur (S), silikon (Si), fosfor (F) karbon (C), serta sesuatu yang bisa diamati disekitar seperti pasir, tanah liat.
- Beberapa golongan dari logam diantaranya: logam berat, logam ringan, logam mulia, dan logam tahan api.
- Adapun karakteristik-karakteristik dari logam adalah sifat mekanik, sifat fisik dan sifat kimia.
- Teori Drude dikenal sebagai teori elektron bebas versi klasik yang dapat digunakan sebagai dasar dalam perhitungan konduktivitas termal ( $\kappa$ ) dan konduktivitas listrik ( $\sigma$ ) pada logam. Secara matematis:

$$\kappa = \frac{1}{2} n v k_b \lambda \quad \text{dan} \quad \sigma = \frac{n e^2 \tau}{m}$$

- Hukum Wiedemann dan Franz membahas perbandingan konduktivitas termal,  $\kappa$  terhadap konduktivitas listrik,  $\sigma$  sebanding dengan temperatur absolut bahan. Secara matematis:

$$\frac{\kappa}{\sigma} = \left( \frac{\pi^2 k_b^2}{3 e^2} \right) T = LT$$

- Teori Sommerfeld yang memodifikasi teori Drude membahas bahwa , elektron dipandang sebagai partikel fermion menggunakan fungsi Fermi-Dirac.
- Teori pita zat padat model Kronig-Penney menjelaskan bahwa elektron bergerak dalam pengaruh potensial yang berubah-ubah.
- Persamaan Kronig dan Penney:

$$P \frac{\sin(\alpha a)}{\alpha a} + \cos(\alpha a) = \cos(ka)$$

- Fungsi Bloch (disebut pula teorema Floquet):
- Zona Brillouin menunjukkan daerah terlarang. Daerah tersebut berada pada nilai bilangan:

$$k = \pm \frac{n\pi}{a}$$

- Superkonduktivitas adalah keadaan beberapa padatan dan aloi mampu memiliki resistivitas listrik hampir nol (konduktivitasnya sangat besar)
- Superkonduktor banyak dimanfaatkan pada berbagai bidang, misalnya pada bidang transportasi yang menggunakan efek Meissner yang diangkat oleh magnet superkonduktor seperti pada kereta api.
- Pemanfaatan superkonduktor pada bidang kedokteran salah satunya adalah *Magnetic Resonance Imaging (MRI)* yang memanfaatkan medan magnet dan gelombang radio, sehingga aman digunakan.

## G. UJI KOMPETENSI

Kerjakanlah soal-soal berikut agar Anda dapat mengukur kemampuan Anda setelah mempelajari bab ini:

1. Jelaskan dan sebutkan karakteristik dari logam.
2. Ada berapa asumsi terpenting dalam teori klasik? Jelaskan salah satunya.
3. Apa yang dimaksud dengan gerak elektron?
4. Dalam teori pita energi dikenal model Kronig-Penney. Dengan menggunakan model tersebut, tunjukkan bahwa apabila  $P$  jauh lebih kecil daripada 1, maka tingkat energi terendah pita adalah:

$$E = \frac{\hbar^2 P}{ma^2}$$

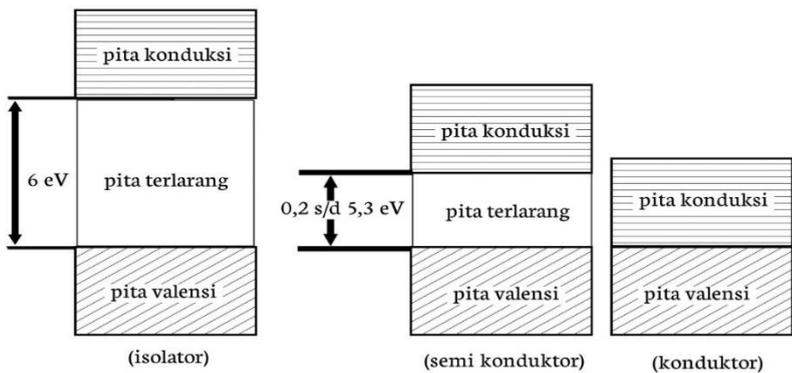
5. Jelaskan beberapa penerapan superkonduktor dalam berbagai bidang.

# BAB IV

## SEMIKONDUKTOR

### A. PENGERTIAN SEMIKONDUKTOR

Suatu bahan dapat diklasifikasikan menjadi konduktor, isolator, dan semikonduktor berdasarkan seberapa baik dapat membawa arus listrik. Bahan dengan hambatan listrik  $10^{-6} \Omega\text{m}$  dianggap sebagai konduktor dan  $(10^{12}-10^{20}) \Omega\text{m}$  dianggap sebagai isolator jika dapat mencegah arus listrik mengalir melewatinya atau menghantarkan listrik secara tidak efisien. Bergantung pada keadaan, semikonduktor dapat berupa konduktor atau isolator. Nilai hambatan listrik semikonduktor pada suhu kamar, berkisar antara  $10^{-4} - 10^7 \Omega\text{m}$ . Germanium, silikon, karbon, dan selenium adalah beberapa bahan yang dapat digunakan untuk membuat semikonduktor.



Gambar IV.1 Klasifikasi bahan berdasarkan pita-nya

Struktur pita energi isolator dan semikonduktor identik, kecuali celah energi atau energi terlarang. Selisih antara ujung atas pita valensi  $E_v$  dan ujung bawah pita konduksi  $E_c$  disebut sebagai energi celah (daerah terlarang). Semikonduktor berperilaku berbeda dari bahan isolator karena celah energi yang kecil ini. Semikonduktor adalah bahan dengan pita terlarang yang sangat kecil ( $\pm 1$  hingga  $2$  eV) dan pita valensi serta pita konduksi yang hampir penuh. Kristal semikonduktor terdiri dari atom-atom yang masing-masing memiliki sejumlah elektron valensi di kulit terluarnya. Elektron ini akan menempati posisi valensi tertentu dan energinya adalah  $E_v$ . Peningkatan energi panas akan menyebabkan putusnya ikatan kovalen jika suhu kristal semikonduktor dinaikkan. Elektron bebas selanjutnya akan lompat ke pita konduksi dengan tingkat energi  $E_c$ .

## **B. JENIS-JENIS SEMIKONDUKTOR**

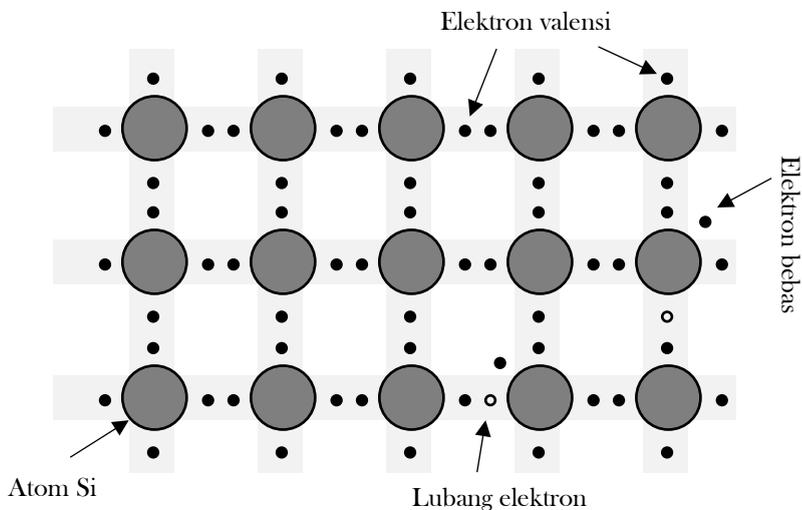
### **1. Semikonduktor Intrinsik**

Semikonduktor murni atau semikonduktor yang belum memiliki atom tambahan yang dimasukkan ke dalamnya dikenal sebagai *semikonduktor intrinsik*. Pada semikonduktor intrinsik, muatan positif dan negatif sama-sama menjadi muatan pembawa. Semikonduktor intrinsik memiliki celah energi (*energi gap*) pada orde 1 eV. Energi ini hampir mirip dengan energi panas sehingga bahan semikonduktor intrinsik dapat diperoleh dengan eksitasi energi kalor elektron yang melintasi celah energi. Beberapa contoh semikonduktor intrinsik adalah Si, Ge, GaAs, InSb, SiC dan PbS.

Pada temperatur  $0$  K, pita valensi semikonduktor intrinsik terisi penuh dan pita konduksinya kosong. Atas dasar inilah pada temperatur tersebut, semikonduktor intrinsik berperilaku seperti sebuah insulator dan memiliki

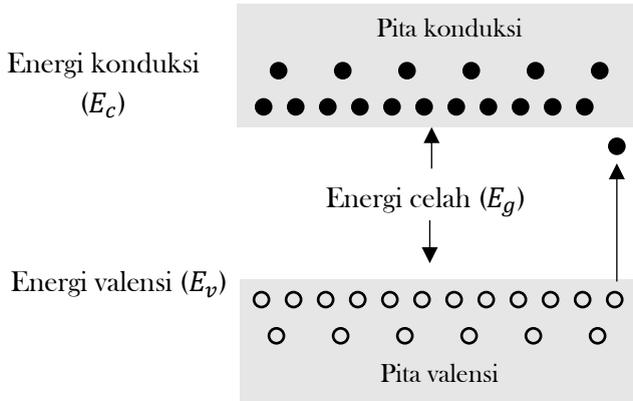
konduktivitas nol. Misalkan terdapat silikon dengan nomor atom 14. Masing-masing silikon bervalensi empat sehingga mampu membentuk empat atom valensi dengan atom tetangganya (pada temperatur 0 K).

Namun, ketika temperatur tersebut meningkat, beberapa ikatan kovalen terputus sehingga elektron dapat bergerak bebas dalam kristal. Elektron yang bergerak itu disebut sebagai *elektron konduksi*. Ketika elektron sudah lepas, tempat yang ditinggalkan elektron disebut lubang elektron atau *hole*. Jadi, ketika satu saja elektron terlepas, sebuah *pasangan elektron-hole (PEH)* akan terbentuk (Gambar IV.2).



Gambar IV.2 Representasi dua dimensi dari kisi silikon

Berdasarkan teori pita, pita energi untuk semikonduktor intrinsik dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar IV.3 Pita energi pada semikonduktor intrinsik

## 2. Semikonduktor Ekstrinsik

Selain bahan murni, terdapat pula semikonduktor yang tidak benar-benar murni. Bahan semikonduktor yang tidak murni dikenal sebagai *semikonduktor ekstrinsik*. Dengan menambahkan sedikit pengotor ke dalam bahan, resistansi jenis bahan semikonduktor sangat mungkin untuk diturunkan. Proses penambahan *dopan* (pengotor) ini disebut sebagai proses pencangkakan. Pencangkakan (*doping*) adalah strategi yang digunakan dalam teori fisika zat padat untuk meningkatkan kemampuan listrik bahan. Upaya ini biasanya dapat dilakukan dengan mencangkakkan ion ke dalam suatu zat sehingga menyebabkan bahan yang awalnya murni menjadi tercemar. Pengotoran ini dapat mengubah karakteristik kelistrikan bahan agar dapat digunakan untuk fungsi tertentu. Semikonduktor ekstrinsik dapat dibedakan menjadi dua, yakni tipe-p dan tipe-n.

### a. Semikonduktor tipe-p

Bahan semikonduktor tipe-p ialah bahan di mana beberapa kecil atom pengotor trivalen ditambahkan ke

semikonduktor murni. Penambahan atom trivalen disebabkan karena atom pengotor ini memiliki tiga elektron valensi, sehingga hanya dapat secara efektif membentuk tiga ikatan kovalen dan meninggalkan satu tempat kosong. Dengan demikian, tiga ikatan kovalen yang lengkap dapat terbentuk ketika atom trivalen menempati posisi atom kosong pada kisi kristal, lalu atom semikonduktor yang tidak berpasangan dapat membentuk muatan positif yang dikenal sebagai lubang (*hole*). Semikonduktor ini dapat diproduksi dengan menggabungkan unsur-unsur dalam golongan IV dengan unsur golongan IIIB seperti B, Al, Ga, dan In. Nama 'p' berasal dari kelebihan muatan positif (lubang) dalam semikonduktor tipe ini.

#### **b. Semikonduktor tipe-n**

Bahan semikonduktor tipe-n adalah bahan semikonduktor yang dikotori oleh atom bervalensi 5. Semikonduktor ini dapat dibuat dengan mencangkokkan arsenik, bismut, fosfor dan antimon. Setelah atom pentavalen ini mencapai posisi kesetimbangan dalam kristal semikonduktor, hanya 4 elektron bebas yang dapat membentuk ikatan-ikatan kovalen yang lengkap. Satu elektron lebihnya tidak akan membentuk ikatan. Nama 'n' berasal dari lebihnya muatan negatif (elektron) dalam semikonduktor tipe ini.

### **C. KONSEP LUBANG ELEKTRON (*HOLE*)**

Sebelumnya telah dijelaskan bahwa ketika temperatur semikonduktor meningkat dari titik nol kelvin, sebagian elektron pada pita valensi akan tereksitasi melewati celah antar pita menuju pita konduksi. Hasilnya adalah semikonduktor akan mempunyai beberapa tempat kosong pada pita valensi. Anda mungkin sudah familier dengan nama dari tempat

kosong tersebut, yaitu lubang atau *hole*. Baik elektron maupun *hole*, sama-sama bertindak sebagai muatan pembawa (*carrier*).

Sekarang, tinjau sebuah kisi satu dimensi, pada salah satu pitanya mempunyai sebuah *hole*. Jika muatan elektron yang sama-sama berada satu pita dengan *hole* tersebut adalah  $-e$  dan kelajuan geraknya adalah  $v_i$ , maka arus yang dihasilkan pada pita tersebut (akibat elektron) adalah:

$$\begin{aligned} I &= \sum -ev_i \\ &= -e \left( v_j + \sum_{i \neq j} v_i \right) \end{aligned}$$

Jika tidak ada medan listrik eksternal, maka arus listrik tidak akan dihasilkan. Dengan demikian,

$$\begin{aligned} -ev_j - e \sum_{i \neq j} v_i &= 0 \\ -e \sum_{i \neq j} v_i &= ev_j \end{aligned}$$

sehingga apabila elektron ke- $j$  keluar dari pita (sehingga terbentuk satu *hole*), maka arus tanpa elektron tersebut adalah:

$$\begin{aligned} I' &= I - (-ev_j) \\ &= \left[ -e \left( v_j + \sum_{i \neq j} v_i \right) \right] + ev_j \\ &= -ev_j - e \sum_{i \neq j} v_i + ev_j \\ &= -e \sum_{i \neq j} v_i \end{aligned}$$

Akan tetapi, pada kondisi tanpa medan listrik, perhatikan bahwa  $I' = ev_j$ . Sekarang, jika terdapat medan listrik ( $E_L$ ), dengan mengingat Pers. III.7 untuk satu dimensi, serta sub-

pembahasan Massa Efektif Elektron pada hal. 49, maka laju perubahan arus  $I'$  terhadap waktu adalah:

$$\begin{aligned}
 \frac{dI'}{dt} &= e \left( \frac{dv_j}{dt} \right) \\
 &= e \left( \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{\hbar} \frac{dE_j}{dk} \right) \right) \\
 &= \frac{e}{\hbar} \left( \frac{d}{dt} \frac{dE_j}{dk} \right) \cdot \frac{dk}{dt} \\
 &= \frac{e}{\hbar} \left( \frac{d}{dk} \left( \frac{dE_j}{dk} \right) \right) \cdot \frac{dk}{dt} \\
 &= \frac{e}{\hbar} \left( \frac{d^2 E_j}{dk^2} \right) \left( -\frac{eE_L}{\hbar} \right) \\
 &= -\frac{e^2 E_L}{\hbar} \frac{dk^2}{d^2 E_j}
 \end{aligned}$$

Akan tetapi, perhatikan bahwa terdapat suku-suku yang familier, yakni  $\hbar dk^2/d^2 E_j$  yang telah kita definisikan sebagai massa efektif elektron yang terlepas ( $m_j^*$ ). Dengan demikian, dapat kita pahami pula bahwa massa efektif *hole* adalah  $|m_j^*|$ .

#### D. KONSENTRASI MUATAN PEMBAWA DALAM SEMIKONDUKTOR

Konsentrasi elektron dan *hole* dalam semikonduktor dapat diketahui dengan mempelajari rapat keadaan yang ada di pita valensi dan konduksi. Telah dijelaskan bahwa pada temperatur 0 K, pita valensi semikonduktor terisi penuh dan pada kondisi ini energi Fermi ( $E_F$ ) lebih besar daripada energi pita valensi ( $E_V$ ). Selanjutnya,  $E_F$  juga akan bernilai lebih kecil daripada energi pita konduksi ( $E_C$ ). Dengan demikian, energi

Fermi pada semikonduktor harusnya berada diantara energi valensi dan energi konduksi. Sekarang, tingkat energi Fermi sendiri dapat diperoleh dengan mengetahui konsentrasi muatan pembawa (elektron dan *hole*).

***Semikonduktor intrinsik.*** Pada semikonduktor intrinsik, konsentrasi elektron dalam pita konduksi adalah:

$$n_e = 2 \left( \frac{2\pi m_e^* k_b T}{h^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_F - E_C}{k_b T}} \quad \text{Pers. IV.1}$$

Adapun konsentrasi *hole* pada pita valensi ditentukan dengan:

$$n_h = \left( \frac{2\pi m_h^* k_b T}{h^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_V - E_C}{k_b T}} \quad \text{Pers. IV.2}$$

Nilai energi Fermi pada semikonduktor intrinsik adalah:

$$E_F = \frac{1}{2} (E_C + E_V) \quad \text{Pers. IV.3}$$

Anda dapat menurunkan persamaan tersebut dengan mengingat bahwa pada semikonduktor intrinsik  $n_e = n_h$ . Selain itu, berlaku pula  $n_c^2 = n_e n_h$ , dengan  $n_c$  adalah konsentrasi muatan pembawa.

***Semikonduktor ekstrinsik tipe-n.*** Pada semikonduktor ekstrinsik (baik tipe-n maupun tipe-p) terdapat satu lagi pita energi, yakni pita *dopan* ( $E_D$ ). Semikonduktor tipe-n memiliki  $E_D$  dibawah energi Fermi Pada semikonduktor ekstrinsik tipe-n, nilai  $n_e$  adalah:

---

Dengan menelaah lebih lanjut Anda akan menemukan formula-formula yang mirip untuk semikonduktor ekstrinsik. Ingat bahwa pada semikonduktor ekstrinsik terdapat tambahan konsentrasi *dopan* atau pengotor.

$$n_e = (2n_D)^{1/2} \left( \frac{2\pi m_e^* k_b T}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\Delta E/2k_b T} \quad \text{Pers. IV.4}$$

dimana  $\Delta E = E_C - E_D$ . Persamaan ini menunjukkan bahwa konsentrasi elektron sebanding dengan akar kuadrat konsentrasi *dopan*.

**Semikonduktor ekstrinsik tipe-p.** Semikonduktor tipe-p memiliki tingkatan energi  $E_D$  diatas energi Fermi, sehingga konsentrasi muatan *hole* nya adalah:

$$n_e = (2n_D)^{1/2} \left( \frac{2\pi m_h^* k_b T}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\Delta E/2k_b T} \quad \text{Pers. IV.5}$$

dengan  $\Delta E = E_D - E_V$ .

## E. PENERAPAN SEMIKONDUKTOR

### 1. Transistor

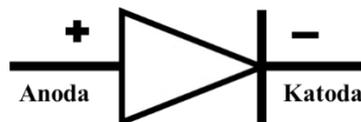
Transistor merupakan komponen yang pada umumnya banyak digunakan dalam rangkaian elektronika, mulai dari rangkaian dengan kompleksitas rendah hingga level canggih. Transistor pertama dibuat pada tahun 1948 oleh seorang peneliti dari laboratorium Bell Telephone. Secara umum, transistor terbagi dalam dua kategori: transistor bipolar, juga dikenal sebagai BJT (*Bipolar Junction Transistor*), transistor efek medan FET (*Field Effect Transistor*). Perbedaan dari kedua jenis transistor BJT dan FET terletak pada prinsip pengendaliannya. FET pada umumnya terdiri dari tiga jenis yaitu JFET, D-MOSFET, E-MOSFET

Transistor BJT merupakan jenis transistor yang dikendalikan oleh arus. Arus keluaran dari jenis transistor ini ditentukan oleh besarnya arus input yang masuk. Sedangkan FET merupakan jenis transistor yang dikendalikan oleh

tegangan. Besarnya arus yang mengalir pada FET dikendalikan oleh besar tegangan input. Di luar perbedaan sudut pandang mekanisme teknis, baik transistor BJT dan FET adalah komponen dasar yang umum digunakan untuk banyak aplikasi mulai dari aplikasi penguat sederhana hingga perangkat pengendali untuk rangkaian komputasi digital kompleks aplikasi yang melibatkan frekuensi rendah hingga frekuensi sangat tinggi serta aplikasi yang melibatkan listrik berdaya rendah hingga daya tinggi.

## 2. Dioda

Germanium atau silikon, yang lebih sering dikenal sebagai dioda junction, merupakan komponen utama yang digunakan dalam pembuatan dioda. Sesuai namanya, struktur dioda ini menghubungkan semikonduktor tipe-p yang berfungsi sebagai anoda dan semikonduktor tipe-n berfungsi sebagai katoda. Dari struktur ini, arus dapat berpindah dari sisi p ke sisi n.



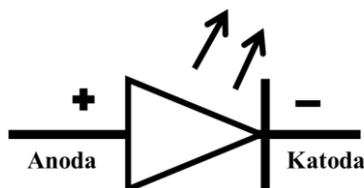
Gambar IV.4 Diagram dioda

Tegangan maju merupakan potensial yang terdapat pada lapisan pengosongan. Potensi kerusakan material pada 25 °C untuk dioda silikon adalah sekitar 0,7 volt, sedangkan untuk dioda germanium sekitar 0,3 volt. Bias maju adalah kondisi yang terjadi ketika satu jenis indikator positif dan yang lainnya negatif.

## 3. LED (*Light Emitting Diode*)

Salah satu kegunaan bahan semikonduktor yang menghasilkan cahaya monokromatik inkoheren ketika dikenai tegangan maju adalah sebagai dioda cahaya (LED).

*Electroluminescence* adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan gejala ini. Warna dihasilkan tergantung pada bahan semikonduktor yang digunakan, dan mungkin juga inframerah dekat atau ultraviolet.



Gambar IV.5 Simbol dioda cahaya

#### 4. Sel Surya

Sel Surya merupakan suatu pelat datar cukup tipis yang terbuat dari kristal silikon. Sel surya mampu memproduksi listrik secara langsung tanpa melalui tahapan konversi energi perantara semisal energi termal ke energi mekanik. Listrik tersebut dihasilkan melalui proses tanpa menyebabkan adanya polusi suara dan polusi udara.

Ketika cahaya dari matahari mengenai elektron di sel pipi, itu memberi mereka energi yang cukup untuk memindahkan sebagian dari mereka menjauh dari sambungan semikonduktor dan menghasilkan listrik. Sel surya terdiri dari dua lapis pita yaitu pita valensi dan pita konduksi. Daerah antara pita valensi dan konduksi dikenal sebagai daerah terlarang (*forbidden gap*). Di daerah antara tersebut terdapat energi yang disebut *band gap energy* yang harus ditangani oleh elektron-elektron yang bergerak. Jika foton memiliki energi yang lebih besar dibanding dengan *band gap energi* kemudian mengenai elektron dari semikonduktor tipe-n, maka elektron tersebut akan mampu lepas dari pita valensi lompat ke pita konduksi. Di sel surya yang memanfaatkan sambungan PN, elektron bebas dari semikonduktor tipe-n yang telah berada di

pita konduksi tersebut dapat bergerak langsung ke arah semikonduktor P. Jika sisi N dihubungkan dengan sisi P melalui rangkaian eksternal, maka melalui rangkaian tersebut elektron bebas ini dapat mengalir dari sisi N kemudian dapat mengisi elektron ke sisi P, sehingga terjadilah aliran listrik dalam sirkuit eksternal tersebut.

## F. RANGKUMAN

Keseluruhan materi dalam bab ini dapat dirangkum secara sederhana sebagai berikut.

- Suatu bahan dapat diklasifikasikan menjadi konduktor, isolator, dan semikonduktor berdasarkan seberapa baik dapat membawa arus listrik.
- Semikonduktor berperilaku berbeda dari bahan isolator karena celah energi yang kecil.
- Semikonduktor intrinsik adalah semikonduktor murni atau semikonduktor yang belum memiliki atom tambahan yang dimasukkan ke dalamnya.
- Semikonduktor ekstrinsik adalah bahan semikonduktor yang tidak murni. Semikonduktor ini terbagi menjadi dua, yakni tipe-p dan tipe-n.
- Konsep lubang elektron (*hole*) bertindak sebagai muatan pembawa (*carrier*).
- Transistor merupakan komponen yang pada umumnya banyak digunakan dalam rangkaian elektronika, mulai dari rangkaian dengan kompleksitas rendah hingga level canggih.
- Germanium atau silikon, yang lebih sering dikenal sebagai dioda junction, merupakan komponen utama yang digunakan dalam pembuatan dioda.

- Dioda cahaya (LED) adalah semikonduktor yang menghasilkan cahaya monokromatik inkoheren ketika dikenai tegangan maju.
- Sel Surya merupakan suatu pelat datar cukup tipis yang terbuat dari kristal silikon.

## G. UJI KOMPETENSI

Kerjakanlah soal-soal berikut agar Anda dapat mengukur kemampuan Anda setelah mempelajari bab ini.

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan semikonduktor.
2. Jelaskan lebih lanjut mengenai proses pengotoran pada bahan semikonduktor sehingga diperoleh bahan semikonduktor ekstrinsik tipe-n dan tipe-p.
3. Jelaskan cara kerja dari sel surya.
4. Suatu spesimen germanium dikotori dengan 0,1% arsenik. Anggaplah bahwa pada suhu ruang semua atom arsenik terionisasi. Jika kerapatan muatan pembawa dalam arsenik adalah  $2,37 \times 10^{19} /\text{m}^3$  dan kerapatan atom germanium adalah  $4,41 \times 10^{28} /\text{m}^3$ . Tentukan kerapatan (konsentrasi) elektron dan hole pada germanium.
5. Energi celah indium pada temperatur 0 K adalah  $1,05 \times 10^{-3}$  eV. Tentukan panjang gelombang maksimum suatu foton yang dapat memutus ikatan suatu atom dengan indium tersebut.

# BAB V

## SIFAT DIELEKTRIK ZAT PADAT

### A. PENGERTIAN DIELEKTRIK

Bahan-bahan yang kita kenal tidak selalu memberikan respon yang sama ketika berada di medan listrik. Beberapa bersifat konduktor, sedangkan yang lain bersifat insulator (dielektrik). Contoh bahan dielektrik diantaranya adalah kertas, teflon, karet, mika, berlian dan kaca. Studi tentang dielektrik dapat dilakukan dengan meninjau model pita energi dielektrik. Model ini hampir mirip dengan model pada semikonduktor, kecuali fakta bahwa pada dielektrik daerah celah terlarang lebih lebar (lihat kembali Gambar IV.1, *isolator*).

Dielektrik merupakan suatu sifat bahan yang buruk dalam menghantarkan listrik atau bisa dikatakan sebagai bahan isolator. Dalam suatu medan listrik, sebuah dielektrik dapat dipandang sebagai susunan ruang bebas dari dipol listrik mikroskopis<sup>1</sup>. Nama dielektrik digunakan menyusul fakta bahwa sebuah insulator akan terpolarisasi ketika berada dalam pengaruh medan listrik. Artinya, bahan itu akan memiliki sebuah dipol listrik atau jika sudah memiliki dipol, maka dipol-dipol tersebut akan memiliki kecenderungan untuk menyusun dirinya sendiri. Suatu dielektrik dikatakan homogen dan

---

<sup>1</sup> Dipol-dipol ini masing-masing tersusun atas muatan positif dan negatif, tetapi pusatnya tidak saling bersinggungan. Dua muatan ini bukanlah muatan bebas dan tidak berperan dalam proses konduksi, tetapi keduanya terikat dengan gaya molekuler. Keduanya hanya akan dapat bertukar posisi sangat kecil ketika ada medan eksternal (*Lihat Hayt, W. H. Jr., & Buck, J. A. (2013). *Engineering Electromagnetics 8th Edition*. McGraw-Hill. h. 127*)

isotropik jika diambil sekumpulan titik secara acak pada dielektrik, maka sifat-sifat dielektriknya sama.

Bayangkan Anda mempunyai dua buah muatan sama besar, tetapi berlawanan tanda, yakni  $+q$  dan  $-q$  yang terpisah sejauh jarak  $r$  pada sumbu- $x$ . Konfigurasi sistem dua muatan ini disebut *dipol listrik*. Momen dipol dapat muncul pada bahan dielektrik ketika dipengaruhi medan listrik dengan dua cara, yakni polarisasi molekul bahan dan penyejajaran dipol. Setiap dipol memiliki *momen dipol* yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\mathbf{p} = q\mathbf{r} \qquad \text{Pers. V.1}$$

dengan  $\mathbf{r}$  adalah vektor pemisah muatan negatif terhadap muatan positif. Satuan dari  $\mathbf{p}$  dalam SI adalah Cm (Coulomb meter). Pastikan Anda tidak bingung dengan cm (centimeter).

---

**Contoh Soal 5.1.** *Momen dipol*

Hitunglah besar momen dipol pasangan muatan titik  $\pm 3 \text{ pC}$  yang terpisah sejauh  $5 \text{ nm}$ .

**Jawaban**

Dengan menggunakan Pers. V.1 diperoleh:

$$\begin{aligned} p &= qr \\ &= (3 \times 10^{-15})(5 \times 10^{-9}) \\ &= 1,5 \times 10^{-23} \text{ Cm} \end{aligned}$$

$\therefore$  Jadi, momen dipol pasangan muatan tersebut adalah  $1,5 \times 10^{-23} \text{ Cm}$ .

---

## B. POLARISASI DAN SUSEPTIBILITAS LISTRIK

Misalkan suatu dielektrik berada dalam pengaruh medan listrik eksternal  $\mathbf{E}_0^\dagger$ , maka momen dipol totalnya tidaklah nol. Dipol tersebut akan mengalami penyearahan ke arah medan listrik\*. *Polarisasi* didefinisikan sebagai momen dipol per satuan volume. Jika semua dipol dalam dielektrik homogen dan isotropik, maka vektor polarisasinya adalah:

$$\mathbf{P} = n\mathbf{p} \quad \text{Pers. V.2}$$

Ketika terjadi polarisasi, besar medan listrik eksternal  $E_0$  menjadi lebih kecil. Dengan demikian, medan listrik total dielektrik menjadi:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_p \quad \text{Pers. V.3}$$

dimana  $\mathbf{E}_p$  disebut *medan polarisasi* atau *medan lokal*.

Secara umum, hubungan polarisasi dan medan listrik makroskopis,  $\mathbf{E}$  adalah:

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E} \quad \text{Pers. V.4}$$

dengan  $\epsilon_0$  adalah permitivitas ruang hampa dan  $\chi_e$  adalah suseptibilitas listrik. *Suseptibilitas listrik* menunjukkan seberapa besar bahan dielektrik mampu terpolarisasi akibat adanya medan listrik makroskopis. Bahan-bahan yang memenuhi Pers. V.4 disebut sebagai dielektrik linier.

---

<sup>†</sup> Anda mungkin mulai bimbang dengan simbol yang kami pilih. Pada bab sebelumnya mungkin Anda akan mengingat  $E$  sebagai energi dan  $E_L$  sebagai kuat medan listrik. Akan tetapi, pada bab ini penggunaan simbol tersebut sedikit akan merepotkan sehingga kami berharap Anda dapat beradaptasi.

<sup>\*</sup> Maksudnya adalah muatan positif dipol akan mendekati sisi negatif medan listrik, begitupun sebaliknya untuk muatan negatif dipol.

---

**Pengayaan 5. Dielektrik dan hukum Gauss**

---

Hukum Gauss dalam bentuk divergensi dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

Secara umum, seringkali dibedakan antara muatan dari luar dielektrik,  $Q$  dan muatan dari dalam dielektrik itu sendiri. Jenis muatan yang pertama ini disebut sebagai **muatan bebas** (*free charge*), sedangkan muatan yang merupakan bagian dari dielektrik disebut sebagai **muatan terikat** (*bound charge*). Dengan demikian, hukum Gauss dapat kita modifikasi menjadi:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho_f + \rho_b)$$

---

### C. KONSTANTA DAN POLARISABILITAS DIELEKTRIK

Pada bahan dielektrik, nilai  $\rho_b$  dapat didefinisikan sebagai divergensi dari polarisasi bahan. Secara matematis dinyatakan sebagai:

$$\rho_b \equiv -\nabla \cdot \mathbf{P}$$

Dengan demikian, menurut hukum Gauss diperoleh:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho_f + \rho_b)$$

$$\epsilon_0 \nabla \cdot \mathbf{E} = \rho_f - \nabla \cdot \mathbf{P}$$

$$\epsilon_0 \nabla \cdot \mathbf{E} + \nabla \cdot \mathbf{P} = \rho_f$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) = \rho_f$$

Sekarang, besaran dalam tanda kurung seringkali disebut sebagai vektor perpindahan listrik, atau

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad \text{Pers. V.5}$$

Selanjutnya, dengan menggabungkan Pers. V.4 dan Pers. V.5 diperoleh:

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon_0 \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E} \\ &= \epsilon_0 (1 + \chi_e) \mathbf{E} \\ &= \epsilon \mathbf{E} \end{aligned} \quad \text{Pers. V.6}$$

Besaran  $1 + \chi_e$  inilah yang dikenal dengan sebutan *permitivitas relatif* atau *konstanta dielektrik* ( $\epsilon_r$ ). Konstanta dielektrik dapat diartikan sebagai ukuran kemampuan bahan untuk menyimpan muatan listrik.

Sampai saat ini Anda telah mendapatkan beberapa faktor yang mempengaruhi polarisasi, yakni momen dipol, medan listrik, bahkan konstanta dielektrik. Selanjutnya akan dibahas mengenai ukuran kemampuan atom penyusun dielektrik untuk mendistribusikan kembali elektronnya sebagai respons terhadap medan listrik yang diberikan (terpolarisasi). Ukuran tersebut disebut dengan *polarisabilitas* ( $\alpha$ ) yang secara matematis didefinisikan sebagai:

$$\mathbf{p} = \alpha \mathbf{E}_P \quad \text{Pers. V.7}$$

Sumber-sumber polarisabilitas ada tiga, yakni polarisabilitas elektronik seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, Selain polarisasi elektronik (seperti yang telah dijelaskan di atas), terdapat pula polarisasi yang lain, polarisasi ionik dan polarisasi orientasi. *Polarisasi ionik* berkaitan dengan zat padat ionik, yang mana terdiri dari ion positif atau biasa disebut kation dan ion negatif atau biasa disebut anion. Contohnya adalah molekul NaCl, terdapat ion  $\text{Na}^+$  dan ion  $\text{Cl}^-$

. Ketika dikenai medan listrik, maka ion positif akan mengalami gaya listrik atau biasa disebut gaya coulomb yang mana arahnya searah dengan medan listriknya. Di sisi lain, ion negatifnya akan bergeser berlawanan arah dengan medan listrik eksternalnya. Jika sebelum diberi medan listrik suatu bahan telah memiliki momen dipol (memiliki dipol permanen), maka bahan tersebut dapat mengalami *polarisasi orientasi*. Pada polarisasi orientasi, masing-masing molekul penyusunnya akan berotasi tanpa mengubah bentuk. Contohnya adalah molekul air atau yang dikenal dengan H<sub>2</sub>O.

## D. EFEK LAIN

### 1. Feroelektrisitas

Suatu peristiwa terjadinya perubahan polarisasi listrik secara langsung (spontan) pada suatu materi yang tidak ada pengaruh medan listrik luar disebut sebagai *feroelektrisitas*. Feroelektrik diindikasikan dengan terjadinya polarisasi listrik secara langsung pada suatu materi yang tidak ada pengaruh medan listrik luar. Bahan feroelektrik dicirikan dengan konstanta dielektrik yang sangat tinggi. Mereka juga memiliki konduktivitas listrik yang sangat rendah dan merupakan isolator. Bahan feroelektrik digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk kapasitor, sensor, dan perangkat memori.

Berhubungan dengan struktur dielektrik, volume sel unit ( $V$ ) memengaruhi nilai polarisasi listrik spontan ( $P_s$ ) melalui hubungan persamaan sebagai berikut.

$$P_s = \frac{(\sum q_i r_i)}{V} \quad \text{Pers. V.8}$$

## 2. Piezoelektrisitas

Piezoelektrisitas adalah fenomena di mana sebuah gaya diberikan terhadap suatu segmen bahan yang menyebabkan adanya muatan listrik di dalam permukaan segmen bahan tersebut karena adanya distribusi muatan listrik dalam sel kristal. Bahasa Latin piezoelektrik adalah *piezein*, memiliki arti ditekan atau dipadatkan, serta *piezo*, yang berarti didorong. Pada tahun 1880-an, bahan piezoelektrik pertama kali ditemukan oleh Jacques dan Pierre Curie. Kata *piezo* juga berarti tekanan, sehingga efek piezoelektrik terjadi ketika suatu bahan mengalami tekanan mekanik terbentuklah medan listrik.

Jacques dan Pierre Curie menggabungkan gagasan mereka tentang piroelektrisitas (kemampuan suatu bahan untuk menghasilkan potensial listrik saat didinginkan atau dipanaskan) dengan mempelajari tentang struktur kristal serta perilaku kristal garam rossel, turmalin, dan kuarsa. Dari hasil kerja tersebut, ditemukan bahwa garam rossel dan kristal kuarsa memiliki piezoelektrik tertinggi pada saat itu. Efek piezoelektrik terjadi ketika arus listrik diterapkan pada suatu material, material bergetar dan sebaliknya, ketika tekanan diterapkan padanya, dihasilkan listrik. Apabila medan listrik melewati suatu bahan, molekul yang terpolarisasi menyesuaikan dengan medan listrik, sehingga didapatkan dipol yang diinduksi pada struktur molekul atau kristal dari bahan tersebut.

## E. RANGKUMAN

Keseluruhan materi dalam bab ini dapat dirangkum secara sederhana sebagai berikut.

- Dielektrik merupakan suatu sifat bahan yang buruk dalam menghantarkan listrik atau bisa dikatakan sebagai bahan isolator.
- Contoh bahan dielektrik diantaranya kertas, teflon, karet, mika, berlian dan kaca.
- Polarisasi ini merupakan keadaan dimana arah molekul dielektrik(dipol) yang bermuatan negatif menuju positif jika dipol dikenai medan listrik maka sejajar dengan medan listriknya.
- Dipol listrik merupakan sebuah muatan dalam listrik yang memiliki besar yang sama namun memiliki arah yang berlawanan.
- Apabila dalam dielektrik molekulnya bersifat polar, maka dielektrik itu akan mempunyai momen dipol yang permanen.
- Apabila sifat molekul dalam dielektrik adalah non polar, adanya medan listrik luar yang memengaruhi akan menimbulkan momen dipol.
- Polarisabilitas adalah kemampuan suatu molekul untuk membentuk dipol spontan (sesaat) ketika dipengaruhi oleh induksi muatan terdekatnya.
- Mekanisme yang mengarah ke polarisasi listrik mikroskopis terbagi menjadi tiga tahapan yaitu polarisasi elektronik, polarisasi ionik, dan polarisasi orientasi.
- Feroelektrik diindikasikan dengan terjadinya polarisasi listrik secara langsung pada suatu materi yang tidak ada pengaruh medan listrik luar dan feroelektrik mampu digambarkan dengan kurva histerisis.

- Piezoelektrik adalah fenomena di mana sebuah gaya diberikan terhadap suatu segmen bahan yang menyebabkan adanya muatan listrik di dalam permukaan segmen bahan tersebut.
- Efek piezoelektrik terjadi ketika arus listrik diterapkan pada suatu material, material tersebut bergetar dan sebaliknya, ketika tekanan diterapkan padanya, dihasilkan listrik.

## F. UJI KOMPETENSI

Kerjakanlah soal-soal berikut agar Anda dapat mengukur kemampuan Anda setelah mempelajari bab ini.

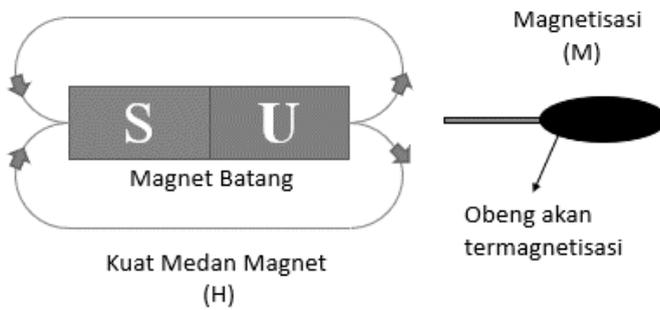
1. Dua muatan  $40\text{ C}$  dan  $-40\text{ C}$  terpisah satu sama lain dengan jarak  $4\text{ cm}$ . Tentukan besarnya momen dipol listrik!
2. Suatu papan ( $\epsilon_r = 2,1$ ) terletak pada daerah  $0 \leq x \leq a$ . Asumsikan  $x < 0$  dan  $x > a$  hanyalah ruang hampa udara. Jika medan listrik disekitar papan adalah  $\mathbf{E}_0 = E_0\mathbf{x}$  (dimana  $\mathbf{x}$  adalah vektor satuan pada arah sumbu- $x$ ), tentukan nilai  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{E}$  dan  $\mathbf{P}$  di dalam dan di luar papan tersebut.
3. Hitunglah polarisasi tetes air hujan yang berjari-jari  $10\text{ mm}$ , jika diketahui momen dipol air hujan adalah  $6 \times 10^{-13}\text{ C.m}$  dan banyak molekul tetes air adalah  $1,40 \times 10^{20} / \text{m}^3$ .
4. Jelaskan beberapa contoh potensi pemanfaatan bahan feroelektrik.
5. Apa yang terjadi saat bahan Piezoelektrik diberikan tegangan listrik!

# BAB VI

## SIFAT MAGNETIK ZAT PADAT

### A. SUSEPTIBILITAS MAGNETIK

Agar Anda dapat lebih memahami apa itu suseptibilitas magnetik, terlebih dahulu perhatikan gambar berikut ini.



Gambar VI.1 Obeng yang termagnetisasi

Dari Gambar VI.1, dapat dilihat bahwa obeng akan termagnetisasi karena adanya medan magnet yang dimiliki oleh magnet batang. Dari fenomena ini kita akan mengenal suseptibilitas magnetik. **Suseptibilitas magnetik** ( $\chi_m$ ) dapat diartikan sebagai kerentanan suatu benda untuk termagnetisasi karena adanya medan magnetik yang diberikan pada benda tersebut. Pada bahan paramagnetik ( $\chi_m > 0$ ) dan diamagnetik ( $\chi_m < 0$ ), magnetisasi (**M**) ditentukan oleh medan magnetnya. Saat **B** dihilangkan, maka **M** juga akan hilang. Magnetisasi juga didefinisikan sebagai besar momen magnetik dipol per satuan volume. Faktanya, pada kebanyakan bahan, magnetisasi akan *sebanding* dengan medan magnet untuk medan yang tidak terlalu kuat. Secara matematis dinyatakan dengan persamaan seperti di bawah ini:

$$\chi_m \equiv \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{H}} \quad \text{Pers. VI.1}$$

sehingga diperoleh  $\mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H}$  dimana  $\mathbf{M}$  adalah vektor magnetisasi bahan (satunya A/m) dan  $\mathbf{H}$  adalah vektor intensitas medan magnet (satunya A/m). Keadaan magnetik sistem linier yang dikaitkan dengan  $\mathbf{B}$  dan  $\mathbf{H}$  memenuhi persamaan:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(1 + \chi_m)\mathbf{H} \quad \text{Pers. VI.2}$$

Dimana  $\mathbf{B}$  adalah kerapatan fluks magnet (A/m) dan besaran  $\mu_0(1 + \chi_m)$  didefinisikan sebagai *permeabilitas material* ( $\mu$ ).

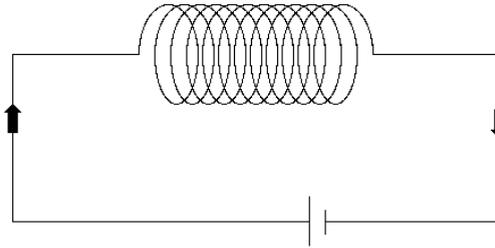
---

**Pengayaan 6.1.** *Pembuktian untuk Pers. VI.2*

Bayangkan sebuah batang yang terbuat dari logam seperti berikut ini.



Selain itu, bayangkan pula sebuah solenoid dengan  $N$  putaran per satuan panjang ( $n$ ) yang membawa arus sebesar  $I$  dengan arah seperti pada gambar berikut.




---

Pada ruang hampa udara, dimana  $\mathbf{M} = \mathbf{0}$ , maka Pers. VI.2 akan menjadi:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

Selanjutnya, perbedaan antara  $\mathbf{H}$  dan  $\mathbf{B}$  dapat ditemukan pada Purcell, E. M., & Morin, D. J. (2013). *Electricity and Magnetism*. Cambridge University Press, h. 560.

Besarnya medan magnetik di dalam solenoid adalah:

$$\mathbf{B}_0 = \mu_0 n \mathbf{I}$$

Selanjutnya, masukkan batang tersebut ke dalam kumparan solenoid. Ketika batang logam dimasukkan, maka batang logam akan termagnetisasi (menjadi bersifat seperti magnet) dan mulai menghasilkan medan magnetnya sendiri, yaitu:

$$\mathbf{B}_m = \mu_0 \mathbf{M}$$

Dengan demikian, medan magnetik total sistem batang-solenoid adalah:

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_m \\ &= \mu_0 n \mathbf{I} + \mu_0 \mathbf{M} \\ &= \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \\ &= \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad \blacksquare \end{aligned}$$

Selanjutnya, jika nilai  $\mathbf{M}$  dimasukkan ke Pers. VI.2 akan diperoleh:

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \\ &= \mu_0 (\mathbf{H} + \chi_m \mathbf{H}) \\ &= \mu_0 \mathbf{H} (1 + \chi_m) \quad \blacksquare \end{aligned}$$

---

## B. DIAMAGNETIK

Diamagnetik adalah bentuk kemagnetan pada suatu bahan yang bersifat sangat lemah. Hal ini ditunjukkan oleh zat penyusunnya yang memiliki suseptibilitas negatif ( $\chi_m < 0$ ). Contoh dari bahan diamagnetik untuk logam adalah perak, emas, dan tembaga; dan atom-atom dengan konfigurasi gas langka seperti A, He, dan Ne. Sifat diamagnetisme berhubungan dengan kecenderungan sebagian muatan listrik bahan untuk melindungi bagian bahan tersebut dari medan magnet yang diterapkan pada benda tersebut. Pada bahan-bahan diamagnetik, dalam medan magnet, gerakan elektron di sekitar inti pusat, untuk orde pertama dalam  $\mathbf{B}$ , sama dengan

gerakan yang mungkin tanpa adanya  $\mathbf{B}$ , *kecuali* untuk superposisi presesi<sup>†</sup> elektron dengan frekuensi sudut sebesar:

$$\omega = |\boldsymbol{\omega}| = \frac{e|\mathbf{B}|}{2m} \quad \text{Pers. VI.3}$$

Jika medan diterapkan pada sistem perlahan-lahan, gerakan rotasi sistem acuan akan sama dengan gerakan asli sistem sebelum pemberian medan magnetik. Pernyataan tersebut dikenal dengan *teorema Larmor* dan nilai  $\omega$  disebut sebagai frekuensi Larmor.

Saat arus elektron rata-rata di sekitar nukleus mula-mula adalah nol, pemberian medan magnet akan menimbulkan sejumlah arus di sekitar nukleus. Arus hasil magnetisasi ini besarnya sebanding dengan momen magnetik yang berlawanan dengan medan yang diterapkan. Keadaan tersebut terpenuhi bahwa frekuensi Larmor (Pers. VI.3) jauh lebih rendah dari frekuensi asal gerak sistem pada medan pusat. Menurut Larmor, presesi  $Z$  elektron pada sistem *sebanding* dengan arus listrik yang dihasilkan oleh presesi tersebut, sehingga

$$I = (-Ze) \left( \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{eB}{2m} \right) = -\frac{Ze^2B}{4\pi m} \quad \text{Pers. VI.4}$$

Berdasarkan teori elektromagnetik, medan magnet akan dihasilkan ketika sebuah arus  $I$  mengalir tegak lurus bidang loop stasioner yang memiliki luas penampang  $A$ . Arus ini sebanding dengan momen dipol magnetik yang dihasilkan. Secara matematis hubungannya adalah sebagai berikut.

$$\boldsymbol{\mu}_m = IA \quad \text{Pers. VI.5}$$

---

<sup>†</sup> Presesi adalah perubahan orientasi sumbu rotasi benda yang berputar.

Selanjutnya, dengan mengambil acuan koordinat bola, besar momen magnetik yang disebabkan oleh pergerakan (bisa membesar, mengecil, berubah sudut) bidang orbit elektron yang memiliki luas penampang  $\pi\rho^2$  adalah:

$$\mu_m = -\frac{Ze^2B}{4m} \langle \rho \rangle^2 \quad \text{Pers. VI.6}$$

dimana  $\langle \rho \rangle^2$  adalah kuadrat rata-rata jarak tegak lurus elektron dari sumbu medan yang melalui inti atom. Pada muatan yang terdistribusi homogen dan merata pada ruang sferik, nilai  $\langle \rho \rangle^2 = 2\langle r \rangle^2/3$ , dimana  $\langle r \rangle^2$  adalah kuadrat rata-rata jarak elektron dari inti atom (nukleus). Dengan demikian, diperoleh nilai suseptibilitas bahan diamagnetik sebagai berikut.

$$\chi_m = -\frac{\mu_0 NZe^2}{6m} \bar{r}^2 \quad \text{Pers. VI.7}$$

Persamaan tersebut dikenal dengan *persamaan Langevin klasik untuk diamagnetisme*.

---

**Contoh Soal 6.1.** *Persamaan Langevin klasik*

Suatu bahan yang konsentrasinya sebesar  $3,45 \times 10^{28}$  atom/m<sup>3</sup> memiliki banyak atom  $Z = 10$  berada pada suhu 4 K. Jika rata-rata jari-jari atom tersebut adalah 0,58 Å, tentukanlah suseptibilitas magnetik bahan tersebut!

*Petunjuk:* massa elektron =  $9,11 \times 10^{-31}$  kg,

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-31}$  H/m, dan

muatan elektron =  $-1,6 \times 10^{-19}$  C

**Jawaban:**

Diketahui:

$$Z = 10$$

$$\begin{aligned}
T &= 4 \text{ K} \\
\langle r \rangle^2 &= 0,58 \text{ \AA} = 0,58 \times 10^{-10} \text{ m} \\
m &= 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg} \\
\mu_0 &= 4\pi \times 10^{-31} \text{ H/m} \\
e &= -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}
\end{aligned}$$

Ditanya:

Suseptibilitas magnetik bahan ( $\chi_m$ )

Penyelesaian:

$$\begin{aligned}
\chi_m &= -\frac{\mu_0 N Z e^2}{6m} \langle r \rangle^2 \\
&= -\frac{(4\pi \times 10^{-7})(3,45 \times 10^{28})(10)(-1,6 \times 10^{-19})^2}{6(9,11 \times 10^{-31})} (0,58 \\
&\quad \times 10^{-10})^2 \\
&= -6,83 \times 10^{-6}
\end{aligned}$$

Jadi, suseptibilitas magnetik bahan tersebut adalah  $-6,83 \times 10^{-6}$ .

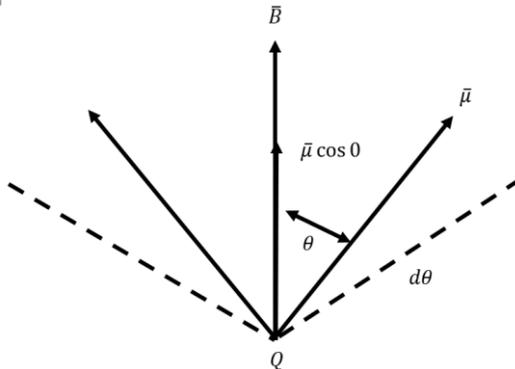
---

### C. PARAMAGNETIK

Pada bahan paramagnetik, magnetisasi pada bahan bersifat paralel terhadap medan magnet yang diberikan padanya, sehingga memiliki suseptibilitas magnetik positif. Paramagnetisme lebih sering terjadi pada atom atau molekul yang memiliki elektron ganjil, dimana mereka memiliki kelebihan atom tidak berpasangan yang akan dikenai torsi

magnetik<sup>\*</sup>. Contoh sifat paramagnetisme dapat ditemukan pada  $Mn^{2+}$ ,  $Gd^{3+}$ ,  $U^{+}$ , logam, molekul oksigen, gas nitrit oksida, atom  $F$  tengah pada halida alkali dan lain sebagainya.

Sama seperti fenomena diamagnetisme, Langevin juga memiliki pendapat mengenai fenomena paramagnetisme. Langevin mempunyai asumsi bahwa jika suatu gas paramagnetik yang memiliki  $N$  atom per satuan volume yang mana memiliki momen magnetik permanen  $\mu_m$ . Interaksi antara dipol-dipol magnetik dianggap dapat diabaikan. Adanya induksi magnetik  $\mathbf{B}$  membuat dipol mengarahkan diri pada arah medan untuk mengurangi energinya. Akan tetapi, energi panas di temperatur tertentu umumnya menolak penyejajaran dipol-dipol sejenisnya. Pada kesetimbangan panas, dipol menyejajarkan diri pada sudut  $\theta$  dengan arah medan yang diberikan, seperti pada Gambar VI.2.



Gambar VI.2 Dipol magnetik dengan momen sebesar  $\mu_m$  terarah pada sudut  $\theta$  terhadap medan magnetik yang diberikan

<sup>\*</sup> Berdasarkan prinsip larangan Pauli, elektron pada atom harus terisi dalam bentuk berpasangan. Hal ini menyebabkan elektron memiliki dua spin berlawanan, sehingga torsi totalnya bernilai nol. Dengan nilai nol ini, medan magnet-pun akan bernilai nol. Lihat Griffiths, D. J. (2013). *Introduction to Electrodynamics 3rd Edition*. Pearson Education, h. 262.

Energi potensial masing-masing dipol pada posisi ini ditentukan oleh persamaan:

$$E = -\boldsymbol{\mu}_m \cdot \mathbf{B} = -\mu_m B \cos \theta \quad \text{Pers. VI.8}$$

Pada mekanika statistik, peluang suatu dipol magnetik untuk membuat sudut antara  $\theta$  dan  $\theta + d\theta$  dengan medan magnet tersebut, atau jumlah dipol ( $dn$ ) yang memiliki sumbu-sumbu pada sudut ruang  $d\omega$  yang terletak diantara dua kerucut berongga dengan sudut puncaknya  $\theta$  dan  $\theta + d\theta$  yang dapat ditentukan dengan:

$$dn \alpha e^{-\frac{\mu_m B \cos \theta}{kT}} d\omega = k e^{-\frac{\mu_m B \cos \theta}{kT}} 2\pi \sin \theta d\theta \quad \text{Pers. VI.9}$$

dimana  $k$  merupakan konstanta. Tiap-tiap dipol memberikan momen magnetik  $\mu_m \cos \theta$  terhadap magnetisasi, sedangkan komponen-komponen yang tegak lurus dengan medan saling meniadakan. Oleh karena itu, komponen rata-rata momen magnetik dari masing-masing atom sepanjang arah medan dikalikan dengan jumlah atom per satuan volume,  $N$  memberikan magnetisasi  $M$ , yaitu:

$$\begin{aligned} M &= N \langle \mu_m \rangle \\ &= N \frac{\int_0^\pi \mu_m \cos \theta}{\int_0^\pi dn} \\ &= N \frac{\mu_m \int_0^\pi \cos \theta \sin \theta \exp\left(\frac{\mu_m B \cos \theta}{kT}\right) d\theta}{\int_0^\pi \sin \theta \exp\left(\frac{\mu_m B \cos \theta}{kT}\right) d\theta} \end{aligned}$$

Misalkan  $\mu_m B/kT = x$  dan  $\cos \theta = y$ , maka diperoleh  $\sin \theta d\theta = -dy$ . Dengan demikian, diperoleh:

$$\begin{aligned}
M &= N \mu_m \frac{\int_1^{-1} y e^{xy} dy}{\int_1^{-1} e^{xy} dy} \\
&= N \mu_m \left[ \frac{e^x + e^{-x}}{e^x - e^{-x}} - \frac{1}{x} \right] \\
&= N \mu_m \left[ \coth x - \frac{1}{x} \right]
\end{aligned}$$

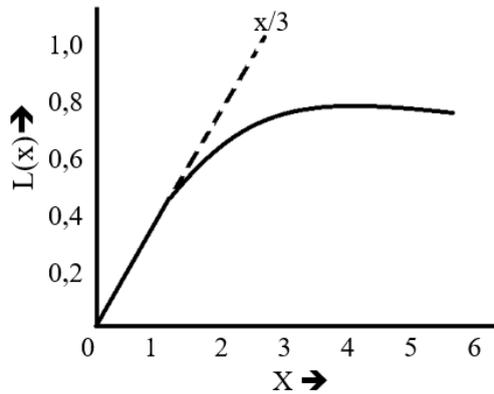
untuk kemudahan, didefinisikan  $\coth x - 1/x = L(x)$ , dimana  $L(x)$  adalah fungsi Langevin untuk paramagnetik.

Perubahan nilai  $L(x)$  pada  $x$  ditunjukkan pada Gambar VI.3. Dari grafik, untuk  $x \ll 1$ , pada kuat medan magnet dan temperatur normal, kurva mendekati linier dan berimpit dengan garis singgung kurva. Garis singgung ini memiliki persamaan  $L(x) \approx x/3$ . Dengan demikian, besar magnetisasi dan suseptibilitasnya menjadi:

$$M \approx \frac{N \mu_m^2 B}{3kT} \quad \text{Pers. VI.10}$$

$$\chi_m \equiv \frac{M}{H} = \frac{\mu_0 M}{B} = \frac{\mu_0 N \mu_m^2}{3kT} \quad \text{Pers. VI.11}$$

Hasil dari Pers. VI.11 menunjukkan bahwa suseptibilitas magnetik berbanding terbalik dengan temperatur bahan.



Gambar VI.3 Variasi  $L(x)$  terhadap  $x = \mu_m B/kT$

Persamaan ini juga dapat dituliskan dalam *konstanta Curie* ( $C$ ), yakni:

$$\chi_m = \frac{C}{T}, \quad C = \frac{\mu_0 N \mu_m^2}{3k} \quad \text{Pers. VI.12}$$

Untuk nilai  $x$  besar, untuk rapat fluks magnetik tinggi dan temperatur rendah,  $L(x)$  mendekati satu dan magnetisasi yang besarnya  $M$  menjadi;

$$M = N \mu_m = M_s \quad \text{Pers. VI.13}$$

Persamaan ini merupakan keadaan jenuh yang bersesuaian dengan pelurusan sempurna dari dipol-dipol magnetik pada arah medan sehingga  $M_s$  disebut sebagai magnetisasi jenuh.

**Contoh Soal 6.2.** *Bahan paramagnetik*

1. Bagaimana nilai suseptibilitas pada magnet yang memiliki material paramagnetik?
2. Sebuah unsur transisi dapat dikatakan sifat paramagnetik ditentukan dari banyaknya?

## Jawaban

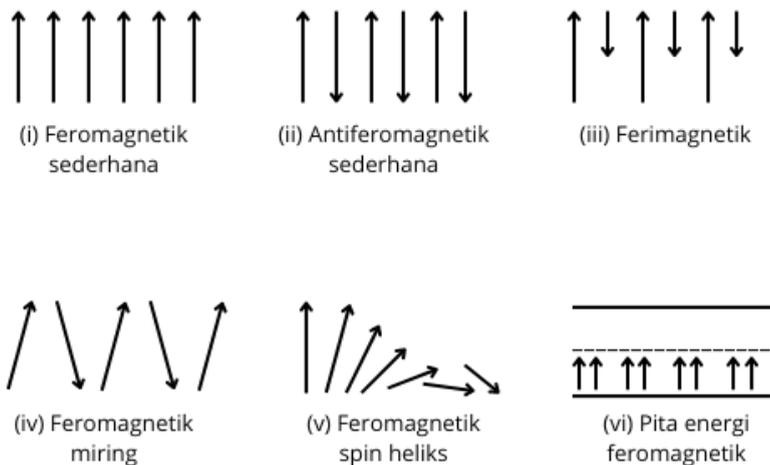
1. Nilai suseptibilitas magnet yang dari bahan paramagnetik berbanding terbalik dengan temperatur. Medan magnet dengan bahan ada jika termagnetisasi oleh medan magnet yang berasal dari luar. Jika pengaruhnya hilang maka medan magnet juga akan menghilang. Akibatnya, pengaruh termal pada gerakan momen dipolnya akan tidak beraturan dan nilai induksi magnetnya kecil. Hal ini dikarenakan jumlah elektronnya ganjil dan sebagian kecil saja spin yang memungkinkan dapat berpasangan.
  2. Sifat sebuah unsur yang mampu ditarik magnet merupakan sifat dari paramagnetik. Sifat paramagnetik dipunyai oleh unsur transisi, hal ini dikarenakan terdapatnya elektron tunggal pada orbital  $d$ . Maka dari itu, sifat ini gampang diinduksikan medan magnet. Jika banyak orbital yang berisi elektron tunggal maka kekuatan induksi dari medan magnet juga akan semakin kuat, maka sifat magnetiknya juga akan semakin besar. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa sebuah unsur transisi dapat dikatakan memiliki sifat paramagnetik ditentukan dari banyaknya elektron tunggal di orbital  $d$ .
- 

## D. FEROMAGNETIK

Feromagnetisme merupakan sifat suatu bahan yang mana memiliki nilai suseptibilitas magnetik positif sangat tinggi. Sifat feromagnetisme dapat ditemukan pada besi murni, kobalt, nikel, perpaduan logam, gadolinium, disprosium dan beberapa senyawa lainnya. Bahan tersebut memiliki magnet yang kuat karena keberadaannya yang domain magnetik sehingga menyebabkan atom tersusun secara sejajar paralel. Ketika

bahan feromagnetik berada pada keadaan tak termagnetisasi, hampir seluruh wilayah akan secara acak terorganisir dan medan magnet bersih secara keseluruhan adalah nol. Bahan feromagnetik dapat dideteksi dengan menggunakan metode magnetik partikel.

Bahan feromagnetik memiliki momen magnetik meskipun tanpa pengaruh medan magnet (magnetisasi sesaat) ketika berada dibawah temperatur Curie (akan dijelaskan sesaat lagi). Spontanitas (ke-sesaat-an) ini memberikan kesan bahwa spin-spin elektron dan momen-momen magnetik tersusun secara teratur. Bahan feromagnetik memiliki interaksi internal yang cenderung mengarahkan momen-momen magnetik sejajar sama satu lain. Selain itu, bahan feromagnetik memiliki elektron yang tidak berpasangan sehingga atom menghasilkan momen magnet total yang tidak nol.



Gambar VI.4. Susunan spin-spin elektron pada bahan feromagnetik

Teori feromagnetisme awal mulanya dicetuskan oleh seorang fisikawan Prancis, Pierre Weiss. *Postulat Weiss* yang dimaksud adalah sebagai berikut.

1. Pada suatu sampel bahan feromagnetisme berisi sejumlah daerah kecil yang mana disebut dengan ranah atau domain, lalu termagnetisasi secara spontan. Besar magnetisasi spontan bahan secara keseluruhan di tentukan oleh jumlah vektor dari masing-masing arah.
2. Magnetisasi setiap arah disebabkan oleh adanya medan pertukaran (*exchange field*)  $\mathbf{H}_E$  yang cenderung menghasilkan susunan dipol-dipol atomik yang sejajar. Besar medan pertukaran  $H_E$  dianggap sebanding dengan besar magnetisasi  $M$  masing-masing ranah, yaitu:

$$H_E = \lambda M \qquad \text{Pers. VI.14}$$

dimana  $\lambda$  disebut sebagai konstanta Weiss. Medan  $H_E$  juga disebut medan molekul atau medan Weiss dan biasanya sangat kuat dibandingkan dengan medan yang diberikan  $\mathbf{B}$ . Berangkat dari postulat 2, besarnya medan magnetik efektif pada sebuah atom atau ion menjadi:

$$H_{ef} = H + H_E = H + \lambda M \qquad \text{Pers. VI.15}$$

Dimana  $H$  adalah medan magnetik eksternal yang diterapkan pada bahan. Pers. VI.15 kemudian sering disebut sebagai *hukum Curie-Weiss*.

Bahan feromagnetik yang berada di atas temperatur Curie (yakni ketika berada di daerah paramagnetik) tidak akan mengalami magnetisasi sesaat. Dengan demikian, suatu medan magnet eksternal harus diberikan agar terjadi magnetisasi. Medan magnet ini haruslah cukup lemah agar tidak masuk ke

keadaan jenuh. Dengan menggunakan definisi Pers. VI.1 dan Pers. VI.12,

$$\begin{aligned}
 \chi_m &= \frac{M}{H_{ef}} = \frac{C}{T} \\
 &= \frac{M}{H_{ef} + \lambda M} = \frac{C}{T} \\
 &= MT = H_{ef}C + \lambda MC \\
 &= MT - \lambda MC = H_{ef}C \\
 &= M(T - \lambda C) = H_{ef}C \\
 &= \frac{M}{H_{ef}} = \frac{C}{T - \lambda C}
 \end{aligned}$$

Nilai  $\lambda C$  didefinisikan sebagai *temperatur Curie* ( $T_C$ ). Jadi, susceptibilitas magnetik bahan feromagnetik adalah:

$$\chi_m = \frac{C}{T - T_C} \quad \text{Pers. VI.16}$$

Bahan paramagnetik akan bersifat feromagnetik ketika  $T_C \rightarrow T$ , sehingga  $\chi_m \rightarrow \infty$ .

---

**Contoh Soal 6.3.** *Bahan feromagnetik*

Berapakah besar susceptibilitas europium(II) oksida (EuO) jika konstanta Curiennya adalah 4,7 K, temperatur bahan 78 K dan temperatur Curie 70 K?

**Jawaban**

Diketahui:

$$C = 4,7 \text{ K}$$

$$T = 78 \text{ K}$$

$$T_C = 70 \text{ K}$$

Ditanya:

Suseptibilitas magnetik bahan ( $\chi_m$ )

Penyelesaian:

$$\begin{aligned}\chi_m &= \frac{C}{T - T_C} \\ &= \frac{4,7}{78 - 70} \\ &= 0,59\end{aligned}$$

Jadi, suseptibilitas magnetik europium(II) oksida pada kondisi tersebut adalah 0,59.

---

**Pengayaan 6.2.** *Teori kuantum untuk penentuan suseptibilitas magnetik bahan*

Penentuan suseptibilitas magnetik bahan feromagnetik juga dapat dirunut dari teori Langevin dengan tinjauan kuantum. Momen magnetik atom atau ion di ruang hampa udara memenuhi hubungan:

$$\boldsymbol{\mu}_m = \gamma \hbar \mathbf{J} = -g\mu_B \mathbf{J}$$

dimana  $\gamma$  adalah perbandingan momen magnetik terhadap momentum sudut (disebut juga *rasio giromagnetik*),  $\hbar \mathbf{J}$  adalah jumlah momentum sudut pada orbital  $\hbar \mathbf{L}$  dan spin  $\hbar \mathbf{S}$ , dan  $\mu_B$  adalah magneton Bohr ( $= e\hbar/2m$ ).

Magnetisasi bahan menurut teori kuantum dapat dihitung dengan persamaan.

$$M = NgJ\mu_B B_J(x), \quad x \equiv \frac{gJ\mu_B B}{k_B T}$$

dimana  $B_J(x)$  adalah fungsi Brillouin dan  $N$  adalah banyaknya atom per satuan volume.  $B_J(x)$  didefinisikan sebagai:

$$B_J(x) = \frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{(2J+1)x}{2J}\right) - \frac{1}{2J} \coth\left(\frac{x}{2J}\right)$$

Saat  $J \gg$ , fungsi Brillouin menjadi identik dengan fungsi Langevin, yakni

$$B_J(x) = L(x) = \coth x - \frac{1}{x} \equiv \frac{x}{3}$$

Pada  $T \rightarrow 0$ , nilai  $x \rightarrow \infty$  sehingga nilai  $B_J(x)$  menjadi 1. Selanjutnya, suseptibilitas dapat ditentukan dengan mengingat definisinya.

---

## E. ANTI FEROMAGNETIK

Bahan anti feromagnetik adalah bahan yang memiliki suseptibilitas positif rendah pada semua domain temperatur. Misalnya terdapat sebuah kristal yang terbentuk dari dua atom A dan B yang terdistribusi di seluruh dua kisi yang saling bertetangga. Jika atom-atom A menempati posisi titik sudut sel unit kubik, maka, atom-atom B akan terletak di pusat kubik kristal. Asumsikan pula interaksi antar atom terjadi sedemikian sehingga spin A cenderung bergerak antiparalel terhadap spin B. Pada temperatur rendah, interaksi ini sangat efektif dan pada pengaruh medan magnet eksternal, magnetisasi sistem ini sangatlah kecil. Peningkatan temperatur pada interaksi-interaksi atom A dan B akan membuat suseptibilitas magnetik sistem meningkat.

Jika temperatur terus meningkat hingga ke titik temperatur kritis (temperatur Neel,  $T_N$ ), suseptibilitas magnetik sistem menjadi maksimum. Saat temperatur dipaksa meningkat, spin kedua atom akan bebas dan sistem akan berubah menjadi bahan paramagnetik. Contoh bahan-bahan anti feromagnetik adalah oksida, sulfida, klorida dan lain sebagainya.

Bahan jenis anti feromagnetik ini memiliki dipol dengan momen sama besar, tetapi dipol-dipol dalam bahan arahnya berselang-seling berlawanan arah satu sama lain. Telah disebutkan sebelumnya bahwa anti feromagnetik dapat diamati pada saat bahan berada di bawah temperatur Neel. Sebuah aproksimasi untuk menghitung *temperatur Neel* yaitu dengan menggunakan hubungan berikut.

$$T_N = \mu_m C \quad \text{Pers. VI.17}$$

dimana  $C$  adalah nilai yang sama dengan ditunjukkan oleh Pers. VI.12. Suseptibilitas bahan anti feromagnetik dapat diketahui dengan menggunakan meninjau dua kasus, yakni sebagai berikut<sup>8</sup>.

***Kasus I***

Pada kasus ini, medan magnet eksternal ( $\mathbf{H}$ ) arahnya tegak lurus terhadap sumbu spin akibat magnetisasi ( $\mathbf{M}$ ). Anggaplah  $M = |M_A| = |M_B|$ , maka kerapatan energi dalam sistem akibat adanya medan magnet sebesar  $H_{\perp}$  adalah:

$$\begin{aligned} U &= \mu_m \mathbf{M}_A \cdot \mathbf{M}_B - \mu_0 H_{\perp} (\mathbf{M}_A + \mathbf{M}_B) \\ &\cong -\mu_m M^2 \left[ 1 - \frac{1}{2} (2\varphi)^2 \right] - 2\mu_0 H_{\perp} M \varphi \quad \text{Pers. VI.18} \end{aligned}$$

dimana  $2\varphi$  merupakan sudut spin A dan B satu sama lain. Pada kondisi energi minimum ( $\partial U / \partial \varphi = 0$ ), nilai  $\varphi$  adalah  $\mu_0 H_{\perp} / 2\mu_m M$ . Dengan demikian, suseptibilitas magnetiknya adalah:

---

<sup>8</sup> Pada temperatur  $T$ , diatas temperatur Neel  $T_N$ , suseptibilitas magnetik bahan hampir tidak bergantung pada arah medan relatif terhadap arah sumbu spin. Lihat Kittel, C. (2005). *Introduction to Solid State Physics*. John Wiley & Sons. h. 343.

$$\chi_{m,\perp} = \frac{2M\varphi}{\mu_0 H_{\perp}} = \frac{1}{\mu_m} \quad \text{Pers. VI.19}$$

**Kasus II**

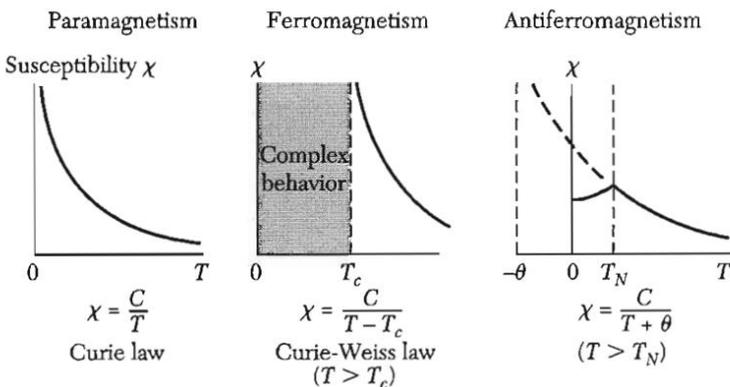
Kasus kedua adalah medan magnet eksternal arahnya sejajar terhadap sumbu spin. Ketika arah medan magnet (**H**) sejajar terhadap sumbu spin yang saling berselang-seling, maka magnetisasi bahan pada 0 K adalah nol, atau:

$$\chi_{m,\parallel} = 0 \quad \text{Pers. VI.20}$$

Ketika suhu meningkat, keadaan diam spin akan mulai terganggu, sehingga mampu menghasilkan sedikit suseptibilitas magnetiknya.

**Pengayaan 6.3.** *Suseptibilitas magnetik bahan anti feromagnetik di daerah paramagnetik*

Kebergantungan suseptibilitas magnetik pada temperatur dalam bahan paramagnetik, diamagnetik dan anti feromagnetik dapat dilihat pada grafik berikut ini.



(Sumber: Kittel, 2005)

Misalkan ingin ditemukan suseptibilitas magnetik bahan anti feromagnetik ketika berada pada daerah paramagnetik, yakni dimana bahan tersebut bertemperatur  $T > T_N$ . Suseptibilitas magnetiknya adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\chi_m &= \frac{2CT - 2\mu_m C^2}{T^2 - (\mu_m C)^2} \\ &= \frac{2C}{T + \mu_m C} \\ &= \frac{2C}{T + T_N}\end{aligned}$$

Pada  $T > T_N$ , nilai  $T_N = \lambda C = T_C$ , sehingga persamaan tersebut setara dengan persamaan berikut ini.

$$\chi_m = \frac{2C}{T + T_C}$$

Akan tetapi, secara percobaan,  $T_N$  biasanya akan lebih kecil daripada  $T_C$ . Hal ini disebabkan model dua sub-kisi terlalu sederhana, sedangkan situasi sebenarnya lebih kompleks.

---

## F. RANGKUMAN

Keseluruhan materi dalam bab ini dapat dirangkum secara sederhana sebagai berikut.

- Suseptibilitas magnetik dapat diartikan sebagai kerentanan suatu benda untuk termagnetisasi. Besarnya adalah:

$$\chi_m = \frac{M}{H}$$

- Keadaan magnetik sistem ditentukan oleh magnetisasi (**M**), yang dikaitkan dengan (**B**) dan (**H**) memenuhi persamaan:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

- Suseptibilitas bahan diamagnetik bernilai negatif ( $\chi_m < 0$ ), sedangkan bahan paramagnetik memiliki suseptibilitas positif ( $\chi_m > 0$ ).

- Diamagnetisme adalah bentuk kemagnetan yang sangat lemah yang ditunjukkan oleh zat-zat dengan kerentanan magnetik negatif
- Paramagnetisme adalah sifat dari karakteristik bahan yang mana mempunyai momen magnetik permanen dan sejajar dengan arah medan magnet dan nilai suseptibilitas magnetiknya berbanding terbalik dengan suhu  $T$ .
- Sifat bahan paramagnetik mempunyai suseptibilitas positif kecil permanen dari ion-ion yang dihasilkan oleh kontribusi momen-momen spin elektron-elektron, gerak orbit elektron-elektron dan momen magnetis spin inti.
- Paramagnetisme ditemukan di logam, atom dan molekul yang mempunyai jumlah elektron ganjil karena spin total tidak dapat nol.
- Feromagnetik merupakan suatu bahan yang memiliki nilai suseptibilitas magnetik positif sangat tinggi.
- Anti feromagnetik, yaitu bahan dengan suseptibilitas positif rendah pada semua suhu dengan perubahan suseptibilitas suhu karena kondisi khusus

## G. UJI KOMPETENSI

Kerjakanlah soal-soal berikut agar Anda dapat mengukur kemampuan Anda setelah mempelajari bab ini.

1. Suatu bahan diamagnetik dipanaskan dari suhu 310 K menjadi 690 K. Berapakah besarnya perubahan suseptibilitas diamagnetisme bahan tersebut?
2. Tentukan suseptibilitas magnetik dari kripton (Kr) dengan nomor atom 36, dimana pada suhu 3 K konsentrasinya adalah  $4,68 \times 10^{28}$  atom/m<sup>3</sup> dan besarnya  $\bar{r}^2$  adalah 0,64 Å!
3. Diketahui beberapa unsur dengan nomor atomnya sebagai berikut, yaitu  ${}_{12}\text{Mg}$ ,  ${}_{9}\text{F}$ ,  ${}_{15}\text{P}$  dan  ${}_{23}\text{V}$ . Tentukanlah apakah

unsur tersebut merupakan paramagnetik atau bukan dan berikan alasannya!

4. Jika  $M(T)$  adalah magnetisasi bahan pada suhu  $T$  ketika bahan mengalami magnetisasi spontan (dengan  $H = 0$ ),  $M_S(0)$  adalah magnetisasi jenuh (yakni kondisi ketika  $T = 0$ ) dan  $B_J(x)$  adalah fungsi Brillouin. Buktikan secara matematis bahwa:

$$\frac{M(T)}{M_S(0)} = B_J(x)$$

5. Tentukan nilai suseptibilitas suatu bahan anti feromagnetik dengan temperatur 92 K dan temperatur Neel 88 K. (diketahui Konstanta Curie = 4,7 K)!

## DAFTAR PUSTAKA

- Aharoni, A., & Entin-Wohlman, O. (2019). *Introduction to Solid State Physics*. World Scientific.
- Akhadi, M. (2019). Memproduksi Bahan Semikonduktor di dalam Teras Reaktor Nuklir. *KILAT (Jurnal Kajian Ilmu dan Teknologi) 4 (1)*, 90-97.
- Babbar, V., & P. R. (1997). *Solid State Physics, 8th edition*. S. Chand & Company LTD.
- Beiser, A. (2003). *Concepts of Modern Physics (6th ed)*. McGraw-Hill.
- Budiharto, W. &. (2007). *Teknik Reparasi PC dan Monito*. Elex Media Komputindo
- Christman, J. R. (1988). *Fundamentals of Solid State Physics*. John Wiley & Sons.
- Dabas, S. (n.d.). *Hukum Maxwell tentang Distribusi Kecepatan*. Shyam Lal College.
- Galsin, J. S. (2019). *Solid State Physics: An Introduction to Theory*. Academic Press.
- Griffiths, D. J. (2013). *Introduction to Electrodynamics (Fourth edition)*. Pearson.
- Grosso, G., & Pastori, .P, G. (2014). *Solid State Physics (Second edition)*. Academic Press, an imprint of Elsevier.

- Haliday, D. &. (1989). *Fisika Jilid 2. Terjemahan Pantur Silaban dan Erwin Sucipto*. Jakarta: Erlangga.
- Hamid, A. (2019). *Pendahuluan Fisika Zat Padat*. Syiah Kuala University Press.
- Hayt, W. H., & Buck, J. A. (2012). *Engineering Electromagnetics (8th ed)*. McGraw-Hill.
- Hoffman, p. (t.thn.). *Solid State Physics*. Wiley.
- Holgate, S. A. (2021). *Understanding Solid State Physics (Second edition)*. CRC Press.
- Ibach, H. &. (2015). Solid-State Physics, an introduction to principles of material science. *In Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015 (Vol. 1)*.
- Indra, G. (2022). *Desain Rangkaian Elektronik Dengan Transistor*. Digitama.
- Jain, V. K. (2022). *Solid State Physics (Third edition)*. Springer; ANE Books India.
- Kittel, C. (2004). *Introduction to Solid State Physics, 8th edition*. Wiley & Sons.
- Meisya, I. J. (2014). Pembuatan Material Feroelektrik Barium Titanat (BaTiO<sub>3</sub>) Menggunakan Metode Solid State Reaction. *Jurnal Fisika Indonesia, XVIII(53)*, 59-61.
- Misbah. (2016). *Modul Fisika Zat Padat*. FKIP ULM.
- Nurfadhilah, A., & Mantofani, A. R. (2021). *Welcome to Renewable Energy*. Dewantara Press.
- Parno. (2006). *Fisika Zat Padat*. Universitas Negeri Malang.
- Purcell, E. M. (2013). *Electricity and Magnetism (Third edition)*. Cambridge University Press.

- Puri, R. K., & Babbar, V. K. (2008). *Solid State Physics*. S. Chand.
- Sendari, S. W. (2021). *Sensor Transducer*. AhliMedia Press.
- Setiadi, D. (2014). *Penalaran Parameter Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) menggunakan Firefly Algorithm (FA) pada Sistem Tenaga Listrik Multimesin*. ITS.
- Snoke, D. W. (2019). *Solid State Physics: Essential Concepts (Second edition)*. Cambridge University Press.
- Sujarwata. (2015). *Sensor Ofet Berbasis Film Tipis Untuk Deteksi Gas Beracun (Vol. 148)*. Deepublish.
- Windartun. (2008). *Superkonduktor*. Universitas Pendidikan Indonesia.

## GLOSARIUM

- celah energi** : perbedaan pada akhir atas pita valensinya dengan pita konduksinya.
- dielektrik** : bahan yang kurang pandai dalam menghantarkan listrik.
- difraksi** : adalah penyebaran atau pembelokan gelombang saat gelombang tersebut melintasi bukaan atau mengelilingi ujung penghalang.
- difusi** : proses yang dihasilkan dari gerakan molekul dimana alirannya berpindah dari daerah berkonsentrasi tinggi ke daerah berkonsentrasi rendah
- dioda** : produsen semikonduktor yang hanya menggunakan satu busur arus germanium atau silikon digunakan untuk membuat dioda, yang lebih sering dikenal dengan dioda junction.
- diode cahaya** : semikonduktor yang memancarkan cahaya monokromatik yang tidak koheren (LED)

<b>dipol magnetik</b>	: magnet di mana kutub yang berlawanan berada di sisi berlawanan dari magnet
<b>dipol</b>	: penggunaan ide momen pada dipol listrik untuk mengukur suatu "polaritas" dari ikatan kimia di dalam suatu molekul.
<b>diskrit</b>	: tidak saling berhubungan.
<b>disprosium</b>	: logam tanah langka yang terang, lembut, berwarna putih keperakan.
<b>domain</b>	: daerah-daerah mikroskopis magnetik tempat atom-atom tersusun atau dikelompokkan.
<b>dopan</b>	: sejumlah kecil bahan ditambahkan ke semikonduktor untuk meningkatkan konduksi listrik
<b>efek meissner</b>	: efek yang mana superkonduktor menghasilkan medan magnet.
<b>eksitasi</b>	: naiknya energi sebuah sistem sehingga lebih tinggi dari keadaan dasarnya
<b>elastis</b>	: kecenderungan bahan padat kembali ke bentuk aslinya.
<b>elektrik</b>	: listrik
<b>elektron</b>	: partikel subatom yang bermuatan negatif dan umumnya ditulis sebagai $e^-$

- elektron bebas** : elektron yang dapat bebas bergerak karena sudah lepas dari ikatan atom
- energi *band gap*** : parameter utama yang membagi semikonduktor dengan material lainnya
- energi fermi** : tingkat energi tertinggi yang ditempati elektron pada suhu
- energi gap** : sebuah energi minimum yang di butuhkan untuk mengeluarkan ikatan kovalen dalam kristal semikonduktor
- energi termal** : energi panas
- faktor-g lande** : faktor penghubung antara frekuensi radiasi dengan medan magnet yang digunakan pada resonansi dan merupakan salah satu dari karakteristik bahan
- ferimagnetik** : momen magnetik yang sejajar berada dalam jumlah yang tidak sama bisa dalam arah paralel dan antiparalel.
- feroelektrik** : suatu peristiwa terjadinya perubahan polarisasi listrik secara langsung pada suatu materi yang tidak ada pengaruh medan listrik luar.
- feromagnetik** : benda atau bahan yang dapat ditarik dengan kuat oleh suatu magnet.

- fonon** : kuantum pembawa energi dalam atom atau molekul zat padat.
- foton** : suatu partikel elementer dalam fenomena elektromagnetik
- fungsi brillouin** : menggambarkan ketergantungan magnetisasi pada medan magnet yang diterapkan dan jumlah kuantum momentum sudut dari momen magnetik mikroskopis material.
- gaya dipol** : gaya yang bekerja antara molekul-molekul polar, yaitu antara molekul yang memiliki momen dipol. Semakin besar momen dipolnya, maka semakin kuat gayanya.
- gaya elektrostatik** : gaya yang timbul pada dua benda/atom yang memiliki muatan listrik statis
- gadolinium** : logam putih keperakan yang lembut dan licin yang bersifat ulet dan mudah dibentuk. Pada suhu kamar logam akan bersifat paramagnetik, namun menjadi feromagnetik saat didinginkan. Temperatur Curie gadolinium adalah  $17^{\circ}\text{C}$
- identical surrounding*** : sifat dari kisi dimana ia akan selalu terlihat sama meskipun dilihat dari sudut pandang berbeda.

- impuritas** : atom asing yang pada material
- ion** : sebuah atom/molekul yang mempunyai muatan listrik total tidak nol.
- isolator** : bahan dengan harga yang tahan pada arus listrik/penghantar listrik yang buruk lainnya memiliki resistivitas sebesar  $10^{12}$ – $10^{20}$   $\omega$  m.
- isolator** : benda atau bahan yang tidak bisa menghantarkan panas/listrik.
- isolator** : bahan yang sulit mengalami perpindahan muatan listrik atau tidak dapat menghantarkan listrik.
- isothermal** : salah satu proses termodinamika yang mana sistem berada di suhu konstan.
- kalor** : suatu energi yang dapat mengalami perpindahan dari benda yang memiliki suhu tinggi ke benda yang memiliki suhu yang lebih rendah.
- kisi** : sekumpulan titik (partikel) dalam larik berukuran dua (atau tiga dimensi).
- kohesi** : gaya tarik menarik antara molekul yang sama, seperti air dengan air atau alkohol dengan alkohol

- konduksi** : sebuah proses perpindahan kalor tanpa diikuti perpindahan bagian-bagian zat tersebut.
- konduktivitas** : kemampuan suatu benda ataupun bahan untuk menghantarkan panas/listrik.
- konduktor** : benda ataupun bahan yang dapat menghantarkan panas/listrik.
- konstanta dielektrik** : perbandingan dari kapasitas kapasitor pelat sejajar dengan bahan dielektrik tertentu dan kapasitas kapasitor pelat sejajar dengan bahan dielektrik udara.
- kuantum orbit** : bilangan yang menunjukkan kedudukan electron pada atom yang wakikan oleh nilai yang menerangkan kuantitas tetap pada sistem dinamis dan menggambarkan sifat elektron di orbital
- kuantum spin** : bilangan kuantum keempat dari seperangkat bilangan kuantum yang menggambarkan keadaan kuantum magnetic elektron
- kurva** : objek yang mirip dengan garis yang tidak harus lurus.
- larik** : sekumpulan objek yang tersusun dalam susunan tertentu.

- logam berat** : logam yang memiliki berat sekitar > 5
- logam mulia** : logam yang tahan dengan korosi dan oksidasi.
- logam ringan** : logam yang memiliki berat < 5
- lubang** : elektron yang meninggalkan kekosongan di pita valensi (*hole*)
- magnetisasi** : sebuah proses ketika sebuah materi yang ditempatkan dalam suatu bidang magnetik akan menjadi magnet
- magnetisasi jenuh** : perkalian antara momen magnet neto tiap atom dengan jumlah atom yang ada
- magneton bohr** : konstanta fisika untuk menyatakan momen magnetik dari suatu elektron yang disebabkan baik karena momentum sudut orbital atau spin
- metalloid** : unsur semi logam yang memiliki sifat perpaduan unsur non logam dengan unsur logam
- mikroprosesor** : sebuah CPU yang di bangun dalam *single chip* semikonduktor
- minoritas** : himpunan dibawah mayoritas, mereka lebih kecil secara jumlah dan power.

- molekul** : bagian terkecil senyawa yang tersusun dari gabungan dua atau lebih atom.
- momen dipol** : perkalian hasil kali muatan listrik dengan jarak antar muatan.
- momen sudut neto** : jumlah seluruh sudut
- non logam** : unsur kimia yang tidak memiliki sifat logam yang dominan
- nonpolar** : molekul yang tidak mempunyai perbedaan muatan pada ujungnya.
- osilator** : perangkat mekanik (atau listrik) yang bekerja dengan prinsip osilasi.
- paramagnetisme** : sifat dari karakteristik bahan, mempunyai momen magnetik tetap yang disejajarkan dengan arah medan magnet dan nilai suseptibilitas magnetiknya berbanding terbalik dengan suhu  $t$
- pita konduksi** : rentang terendah dari keadaan elektronik kosong
- pita valensi** : rentang energi elektron tertinggi dimana elektron biasanya hadir pada suhu mutlak
- polar** : molekul yang mempunyai sebuah dipol (dua kutub muatan)

- polarisabilitas** : kemampuan molekul untuk membuat dipol sesaat ketika diinduksi oleh muatan terdekatnya.
- polarisasi** : pergeseran muatan-muatan yang ada pada dielektrikum.
- polarisasi elektronik** : adanya pergeseran suatu elektron dalam atom atau molekul disebabkan adanya medan listrik sehingga terjadi polarisasi.
- polarisasi ionik** : perpindahan muatan serta pembentukan dipol dalam bahan dielektrik ketika ditempatkan di medan liar.
- polarisasi orientasi** : polarisasi yang terjadi pada material yang dengan molekul asimetris sehingga mengakibatkan dipol permanen.
- proton** : partikel penyusun inti atom yang bermuatan positif
- resistivitas listrik** : sifat dasar bahan yang mengukur seberapa kuat mampu menahan arus listrik.
- sel** : sub-larik kecil ketika suatu larik kisi dibagi-bagi menjadi beberapa bagian.
- sel primitif** : sel unit yang tidak memiliki partikel di tengah/dalam sel.

- sel surya** : suatu plat datar cukup tipis yang terbuat dari kristal silikon. Sel surya mampu memproduksi listrik secara langsung tanpa melalui tahapan konversi energi perantara semisal energi termal ke energi mekanik. Listrik tersebut dihasilkan melalui proses tanpa menyebabkan adanya polusi suara dan polusi udara.
- sel unit** : sel terkecil yang jika diulang-ulang dalam suatu larik akan membentuk sebuah kristal.
- suhu neel** : suhu yang menandai perubahan sifat magnetik dari anti feromagnetik ke paramagnetik
- superkonduktor** : bahan yang tidak mempunyai hambatan tapi memiliki arus yang mengalir dibawah nilai suhu tertentu
- suseptibilitas magnetik** : kerentanan suatu benda untuk termagnetisasi
- transistor** : komponen elektronika semikonduktor yang terdiri dari tiga terminal yang dibentuk dengan menghubungkan dua komponen dioda serta berurutan
- trivalen** : benda yang bervalensi tiga

- volume molar** : volume satu mol suatu zat pada tekanan dan suhu tertentu
- x-ray** : salah satu jenis radiasi gelombang elektromagnetik yang dapat menampilkan gambar bagian tubuh.

## INDEKS

celah energi, 60, 71, 108  
dielektrik, iv, vii, 73, 74, 75, 76, 77, 79, 80, 108, 112, 115  
difraksi, xi, 14, 15, 16, 20, 108  
difusi, 18, 108  
dioda, 68, 69, 71, 108, 116, 121  
diode cahaya, 108  
dipol, 73, 74, 75, 78, 80, 83, 89, 90, 93, 95, 99, 108, 114, 115  
dipol magnetik, 89, 90, 93, 108  
diskrit, 23, 31, 109  
disprosium, 94, 109  
domain, 94, 95, 99, 109  
dopan, 62, 67, 109  
efek meissner, 109  
eksitasi, 55, 60, 109  
elastis, 23, 40, 109  
elektrik, 109  
elektron, iv, vii, 18, 22, 27, 36, 37, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 57, 58, 60, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 70, 71, 72, 86, 87, 88, 89, 93, 94, 95, 103, 109, 112, 113, 114, 115, 120, 121  
elektron bebas, 27, 36, 37, 43, 44, 46, 47, 51, 52, 54, 57, 63, 70, 109  
energi *band gap*, 109  
energi fermi, 47, 109  
energi gap, 60, 110  
energi termal, 21, 70, 110, 115  
faktor-g lande, 110  
ferimagnetik, 110  
feroelektrik, 78, 81, 82, 110  
feromagnetik, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 103, 104, 110, 111, 116  
fonon, 21, 24, 26, 27, 31, 33, 35, 36, 37, 39, 110  
foton, 21, 36, 70, 72, 110

fungsi brillouin, 110  
gaya dipol, 110  
gaya elektrostatik, 111  
godolinium, 111  
identical surrounding, 2, 111  
impuritas, 111  
ion, 18, 22, 23, 24, 43, 44, 46, 62, 78, 96, 98, 103, 111  
isolator, 59, 60, 71, 73, 78, 80, 111, 121  
isotermal, 35, 111  
kalor, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 38, 39, 60, 112  
kisi, iv, vii, xi, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17,  
19, 21, 22, 23, 25, 27, 28, 31, 32, 35, 38, 39, 44, 47, 50, 51,  
61, 63, 64, 99, 102, 111, 112, 115, 120  
kohesi, 112  
konduksi, 43, 45, 46, 54, 60, 61, 66, 70, 73, 109, 112  
konduktivitas, 36, 37, 38, 44, 45, 47, 55, 57, 61, 78, 112  
konduktor, 37, 47, 54, 59, 71, 73, 112, 121  
konstanta dielektrik, 77, 78, 112  
kuantum orbit, 112  
kuantum spin, 112  
kurva, 81, 91, 113  
larik, 2, 4, 19, 30, 42, 112, 113, 115  
logam berat, 41, 57, 113  
logam mulia, 41, 57, 113  
logam ringan, 41, 57, 113  
lubang, 17, 18, 61, 63, 64, 71, 113  
magnetisasi, 83, 84, 86, 89, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 99, 100,  
101, 102, 104, 110, 113  
magnetisasi jenuh, 93, 104, 113  
magneton bohr, 113  
metaloid, 41, 113  
mikroprosesor, 113  
minoritas, 113  
molekul, 1, 19, 74, 78, 79, 80, 82, 89, 96, 103, 108, 109,  
110, 111, 112, 113, 114, 115  
momen dipol, 74, 75, 77, 78, 80, 81, 87, 93, 111, 114

**non logam, 41, 113, 114**  
**nonpolar, 114**  
**osilator, 21, 26, 30, 32, 114**  
**paramagnetisme, 89, 114**  
**pita konduksi, 60, 61, 64, 66, 70, 108, 114**  
**pita valensi, 53, 60, 61, 64, 66, 70, 108, 113, 114**  
**polar, 80, 110, 114**  
**polarisabilitas, 77, 114**  
**polarisasi, 27, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 110, 114, 115**  
**polarisasi elektronik, 78, 81, 115**  
**polarisasi ionik, 78, 81, 115**  
**polarisasi orientasi, 78, 81, 115**  
**proton, 115**  
**resistivitas listrik, 55, 58, 115**  
**sel, xi, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 20, 70, 72, 79, 99, 115, 120**  
**sel primitif, 2, 3, 20, 115**  
**sel surya, 70, 72, 115**  
**sel unit, 2, 3, 4, 8, 79, 99, 115**  
**suhu neel, 116**  
**superkonduktor, 55, 56, 58, 109, 116**  
**suseptibilitas magnetik, 83, 88, 89, 92, 94, 96, 97, 98, 99,  
100, 101, 103, 114, 116**  
**transistor, 68, 116, 121**  
**trivalen, 63, 116**  
**volume molar, 116**  
**x-ray, 116**

# LAMPIRAN-LAMPIRAN

## LAMPIRAN I. KUNCI JAWABAN UJI KOMPETENSI

*Kunci jawaban diberikan hanya untuk beberapa soal dan dalam bentuk jawaban akhir/petunjuk saja.*

### BAB I SUSUNAN KRISTAL

1.  $\lambda = 0,157 \text{ mm}$
2. 4 atom
3. Basis adalah gugusan atom pada setiap titik kisi, sedangkan sel satuan adalah bagian terkecil
4. -
5.  $\lambda_1 = 0,8804 \text{ \AA}$ ;  $\lambda_2 = 0,4402 \text{ \AA}$ ;  $\lambda_3 = 0,2935 \text{ \AA}$ ;  
 $\lambda_4 = 0,2201 \text{ \AA}$ ;

### BAB II DINAMIKA KISI

1.  $1/\sqrt{3}$
2. *Petunjuk: selesaikan  $F_r = F_{\text{pegas}}$*
3. *Petunjuk: selesaikan  $g(\omega) d\omega = g(k) dk$  dengan menggunakan  $g(\omega) d\omega = \frac{1}{\pi} dk$*
4. -
5.  $c_v = 3N \hbar^2 \omega_E^2 \exp\left(\frac{\hbar\omega_E}{kT}\right) / kT^2 \left(\exp\left(\frac{\hbar\omega_E}{kT}\right) - 1\right)^2$

### BAB III ELEKTRON DALAM LOGAM

1. Sifat mekanik, sifat fisik, sifat kimia
2. Salah satunya adalah kecepatan elektron mengikuti distribusi kecepatan Maxwell-Boltzman

3. -
4. *Petunjuk: atur  $\cos(ka) = 1$  dan gunakan aproksimasi  $\sin t \approx t$  jika diperlukan.*
5. Salah satunya adalah dioda

#### BAB IV SEMIKONDUKTOR

1. Bahan yang sifat-sifat kelistrikannya terletak antara sifat-sifat konduktor dan isolator
2. -
3. Sel surya pada dasarnya terdiri atas sambungan p-n yang sama fungsinya dengan sebuah dioda.
4.  $n_e = 4,41 \times 10^{28} / \text{m}^3$  dan  $n_h = 1,27 \times 10^{13} / \text{m}^3$
5.  $\lambda = 1,18 \times 10^7 \text{ \AA}$

#### BAB V SIFAT DIELEKTRIK ZAT PADAT

1.  $8\epsilon_0 A/3d$  satuan
2.  $D = 0$  (di luar),  $D = \epsilon_0 E_0$  (di dalam)  
 $P = 0$  (di luar),  $P = 0,524E_0$  (di dalam)  
 $E = 0,476E_0$  (di dalam)
3.  $8,4 \times 10^{-10} \text{ C/m}^2$
4. Berpotensi pada penggunaan kapasitor, transistor dan berbagai komponen elektronika
5. Timbul getaran suara

#### BAB VI SIFAT MAGNETIK ZAT PADAT

1.  $\Delta\chi_m = 0$
2.  $-4,06 \times 10^{-5}$
3.  ${}_{12}\text{Mg}$ : diamagnetik,  ${}_{9}\text{F}$ ,  ${}_{15}\text{P}$ ,  ${}_{23}\text{V}$ : paramagnetik,  
*Petunjuk: periksa elektron tak berpasangannya.*
4. *Petunjuk: gunakan Pengayaan 6.2 dan definisi dari  $\chi_m$ .*
5. 0,052

## LAMPIRAN II. TABEL-TABEL TETAPAN FISIS BEBERAPA BAHAN

### *Suseptibilitas magnetik bahan*

Bahan	Rapat Massa ( $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )	Suseptibilitas Magnetik ( $\times 10^{-6}$ )
<i>Batuan beku</i>		
Andesit	2,61	170.000
Basal	2,99	250-180.000
Diorit	2,85	630-130.000
Gabro	3,03	1.000-90.000
Granit	2,64	0-50.000
Batuan beku asam (rata-rata)	2,61	38-82.000
Batuan beku basa (rata- rata)	2,79	550-120.000
<i>Mineral non-magnetik</i>		
Kuarsa ( $\text{SiO}_2$ )	2,65	-(13-17)
Grafit (C)	2,16	-(80-200)
Gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	2,34	-(13-29)
Magnesit ( $\text{MgCO}_3$ )	3,21	-15
Kalsit ( $\text{CaCO}_3$ )	2,83	-(7,5-39)
Halit ( $\text{NaCl}$ )	2,17	-(10-16)
Galena ( $\text{PbS}$ )	7,50	-33

*Konduktivitas termal*

Bahan	Konduktivitas Termal (W/m·K)	Bahan	Konduktivitas Termal (W/m·K)
Beton	0,8	Berlian	1000
Air <sup>#</sup>	0,6	Perak	406,0
Asbes	0,08	Tembaga	385,0
Kaca fiber	0,04	Emas	314
Batu bata, isolasi	0,15	Kuningan	109,0
Bata merah	0,6	Aluminium	205,0
papan gabus	0,04	Besi	79,5
Wol terasa	0,04	Baja	50,2
Wol batu	0,04	Timbal	34,7
Styrofoam	33	Air raksa	8,3
Poliuretan	0,02	Es	1,6
Kayu	0,12-0,04	Kaca, biasa	0,8
Udara <sup>#</sup>	24	Helium	138
Nitrogen	234	Hidrogen	172
Oksigen	238	Silika gel	3

<sup>#</sup> Pada 0 °C

Pada 20 °C

*Konstanta dielektrik*

<b>Bahan</b>	<b>Konstanta Dielektrik</b>	<b>Bahan</b>	<b>Konstanta Dielektrik</b>
Alkohol	16-31	Kertas	2,0-2,5
Asam asetat	6,2	Parafin	1,9-2,5
Asetat	3,2-7,0	Pasir	3,0-5,0
Benzena	2,3	Garam	3,0-15,0
Berlian	16,5	Wijen	1,8-2,0
Butana	20	Silikon	2,4
Dolomit	3,1	Salju	3,3
Etil asetat	6,4	Gula	3
Freon	2,2	Teflon	2
Kalsium	3	Tembakau	1,5
Karbon	~ 1,0	Urea	5-8
dioksida			
Udara	~ 1,0	Kerosin	1,8

*Temperatur Debye*

Bahan	Temperatur Debye (K)	
	Limit Temperatur Rendah (pada 0 K)	Temperatur Ruang (pada 298 K)
Aluminium	433	390
Argon	92	-
Kalsium	229	230
Boron	1480	1362
Disprosium	183	158
Sesium	40,5	43
Germanium	373	403
Besi	477	373
Hidrogen	122	-
Emas	162,3	178
Timah	105	87
Silikon	645	692
Perak	227,3	221
Seng	329	237
Litium	344	448

*Kalor jenis*

<b>Bahan</b>	<b>Kalor Jenis (J/kg·C°)</b>	<b>Bahan</b>	<b>Kalor Jenis (J/kg·C°)</b>
Alkohol, etil	2440	Tembaga	385
Aluminium	436	Berlian	516
Arsenik	348	Es (0°C)	2093
Beton aspal	920	Emas	129
Bismut	130	Hidrogen	14304
Boron	960	Timbal	129
Perunggu	370	Marmer	880
Kadmium	234	Neon	1030
Kalsium	523	Garam	880
Kapur	750	Tanah kering	800
Arang	840	Seng	388
Kromium	452	Titanium	523