

PENGANTAR FISIKA ZAT PADAT

PENULIS:

- Fahmy Rinanda Saputri
- Kurniati Abidin
- Muh. Said L
- Fitriyanti
- Rahmaniah
- Jannes Bastian Selly
- Fetronela Rambu Bobu
- Sefrilita Risqi Adikaning Rani
- Nurul Fuadi



PENGANTAR FISIKA ZAT PADAT

**Fahmy Rinanda Saputri
Kurniati Abidin
Muh. Said L
Fitriyanti
Rahmaniah
Jannes Bastian Selly
Fetronela Rambu Bobu
Sefrilita Risqi Adikaning Rani
Nurul Fuadi**



GET PRESS INDONESIA

PENGANTAR FISIKA ZAT PADAT

Penulis :

Fahmy Rinanda Saputri
Kurniati Abidin
Muh. Said L
Fitriyanti
Rahmaniah
Jannes Bastian Selly
Petronela Rambu Bobu
Sefrilita Risqi Adikaning Rani
Nurul Fuadi

ISBN :

Editor : Dr. Oktavianis, M.Biomed.

Penyunting : Mila Sari., S.ST, M.Si

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat

Website : www.getpress.co.id

Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, November 2024

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Pengantar Fisika Zat Padat ini.

Buku Ini Membahas Struktur Kristal, Ikatan Kimia Dalam Kristal, Difraksi Sinar-X, Sifat Termal Zat Padat, Getaran Kristal, Teori Elektron Bebas, Teori Elektron Dalam Logam, Semikonduktor, Konsep Superkonduktivitas.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, November 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
BAB 1 STRUKTUR KRISTAL	1
1.1 Struktur Kristal	1
1.2 Jenis-jenis Kisi Kristal.....	2
1.3 Basis dan Vektor Primitif.....	3
1.4 Simetri Kristal.....	7
1.5 Difraksi Kristal.....	9
1.6 Cacat Kristal	11
DAFTAR PUSTAKA.....	13
BAB 2 IKATAN KIMIA DALAM KRISTAL.....	15
2.1 Pendahuluan.....	15
2.2 Jenis-jenis Ikatan dalam Kristal	17
2.2.1 Ikatan Ionik.....	17
2.2.2 Ikatan Kovalen	19
2.2.3 Ikatan Logam	23
2.2.4 Ikatan Van der Waals	25
2.2.5 Ikatan Hidrogen	26
2.3 Energi Ikatan dan Stabilitas Struktur Kristal	27
2.4 Sifat Fisik yang Dipengaruhi oleh Jenis Ikatan.....	29
2.4.1 Kekerasan	29
2.4.2 Titik leleh dan titik didih	30
2.4.3 Konduktivitas Listrik.....	30
2.4.4 Konduktivitas Termal.....	31
2.4.5 Sifat Optik.....	31
DAFTAR PUSTAKA.....	33
BAB 3 DIFRAKSI SINAR X.....	35
3.1 Pengantar	35
3.2 Sejarah dan Perkembangan Difraksi Sinar X	36
3.3 Prinsip Kerja Difraksi Sinar X.....	40
3.4 Hukum Bragg dan Difraksi Sinar X.....	41
3.5 Metode Difraksi Sinar X dalam Kristalografi.....	44
3.6 Analisis Pola Difraksi Sinar X	48

3.7 Aplikasi Difraksi Sinar X dalam Material Sains.....	51
DAFTAR PUSTAKA	55
BAB 4 SIFAT TERMAL ZAT PADAT	57
4.1 Pendahuluan	57
4.2 Kapasitas Panas Fonon	58
4.2.1 Distribusi Planck	59
4.2.2 Model Einstein	62
4.2.3 Model Debye	65
4.3 Kapasitas Panas Bahan.....	69
4.3.1 Konduktor	69
4.3.2 Isolator	70
4.4 Aplikasi Praktis dari Sifat Termal Zat Padat	72
DAFTAR PUSTAKA	75
BAB 5 GETARAN KRISTAL.....	79
5.1 Pendahuluan	79
5.2 Monatomik Basis	80
5.2.2 <i>Boundary Conditions and Allowed Modes</i>	82
5.2.3 <i>Phonons</i>	83
5.3 <i>Diatomic Basis</i>	85
5.3.1 Batas Panjang Gelombang Besar (<i>Long Wavelength Limit</i>).....	86
5.3.2 Gelombang di Sekitar Zona Brillouin.....	87
5.3.3 Gelombang Akustik, Gelombang Optik, dan Celah Energi.....	88
5.4 Hamburan dari Fonon (<i>Scattering from Phonons</i>)	90
DAFTAR PUSTAKA	93
BAB 6 TEORI ELEKTRON BEBAS	95
6.1 Pendahuluan	95
6.2 Struktur Atom.....	96
6.2.1 Partikel Penyusun Atom	96
6.2.2 Inti Atom	98
6.2.3 Lintasan Orbit Elektron	98
6.2.4 Konfigurasi Elektron	101
6.2.5 Eksitasi Elektron.....	102
6.3 Ionisasi Atom atau Molekul	105
DAFTAR PUSTAKA	107

BAB 7 TEORI ELEKTRON DALAM LOGAM.....	109
7.1 Pendahuluan.....	109
7.2 Teori Elektron dalam Logam	109
7.2.1 Teori Drude (Model Klasik Elektron Bebas).....	109
7.2.2 Teori Sommerfeld (Pendekatan Kuantum)	115
DAFTAR PUSTAKA.....	122
BAB 8 SEMIKONDUKTOR	123
8.1 Pendahuluan.....	123
8.2 Struktur Pita Energi Semikonduktor	124
8.3 Bahan Semikonduktor	128
8.4 Jenis-jenis Semikonduktor	132
8.4.1 Semikonduktor Intrinsik.....	132
8.4.2 Semikonduktor ekstrinsik.....	136
DAFTAR PUSTAKA.....	142
BAB 9 SUPERKONDUKTIVITAS	143
9.1 Pendahuluan.....	143
9.1.1 Sejarah Penemuan Superkonduktivitas.....	144
9.2 Karakteristik Superkonduktivitas.....	147
9.2.1 Sifat kelistrikan Superkonduktor.....	147
9.2.2 Sifat Kemagnetan Superkonduktor dan Efek Meissner	150
9.2.3 Medan Kritis	152
9.2.4 Tegangan Kritis dan Arus Kritis.....	155
9.2.5 Kuantisasi Fluks Magnetik	155
9.2.6 Efek Josephson	155
9.3 Teori-teori superkonduktivitas	156
9.3.1 Pembentukan Pasangan Cooper (<i>Cooper Pairs</i>).....	156
9.3.2 Teori BCS (<i>Bardeen-Cooper-Schrieffer</i>).....	157
9.3.3 Teori Ginzburg-Landau.....	159
9.4 Superkonduktor Suhu Tinggi (<i>High-Temperature Superconductors</i>)	161
9.5 Aplikasi Superkonduktor	162
DAFTAR PUSTAKA.....	165
BIODATA PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel 6.1. Karakteristik partikel sub-atom.....	97
Tabel 6.2. Jumlah maksimum elektron pada sub kulit	101
Tabel 8.1. Bagian Tabel Periodik Terkait Semikonduktor	129
Tabel 8.2. Material semikonduktor	131
Tabel 9.1. Perbandingan Karakteristik Superkonduktor	162

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Ilustrasi Sel Satuan dan Primitif.....	4
Gambar 1.2. Ilustrasi Pembentukan Struktur Kristal	4
Gambar 1.3. Parameter Model Kisi 3D	6
Gambar 1.4. Sistem Kristal Dasar	6
Gambar 1.5. Kisi Kubus Sederhana	8
Gambar 1.6. Kisi FCC.....	8
Gambar 1.7. Kisi BCC	9
Gambar 1.8. Ilustrasi Difraksi kristal.....	10
Gambar 2.1. a). Potensial antar atom untuk ikatan pada zat padat dengan $n = 6$ dan $m = 1$, b) Gaya yang dihasilkan $-grad\phi(r)$	16
Gambar 3.1. Skema Hukum Bragg pada Difraksi Sinar X	40
Gambar 3.2. Metode Difraksi Sinar X dalam Kristalografi.....	45
Gambar 4.1. Plot grafik fungsi distribusi planck5.....	9
Gambar 4.2. Grafik kapasitas panas bahan konduktor dan isolator.....	71
Gambar 5.1. Grafik hubungan dispersi untuk rantai Monatomic	81
Gambar 6.1. Ikatan kimia pada kristal padat.....	95
Gambar 6.2. Lintasan orbit elektron dan tingkat energi masing-masing lintasan.....	100
Gambar 6.3. Skema pengisian eletron pada sub-kulit berdasarkan tingkat energi.....	102
Gambar 6.4. Skema proses eksitasi elektron akibat penyerapan energi foton (a) atau melalui tumbukan dengan partikel lain (b).....	103
Gambar 6.5. Skema perbedaan kondisi eksitasi dan deeksitasi elektron	104
Gambar 6.6. Skema perubahan atom menjadi ion postif atau negatif saat kehilangan atau menerima elektron.....	106
Gambar 7.1. Kotak potensial satu dimensi (a) dan (b) tingkat energi dan fungsi gelombang.	116

Gambar 7.2. Sembilan elektron menempati lima tingkatan energi dalam keadaan dasar.....	119
Gambar 7.3. Peluang elektron menempati tingkat energi saat $T=0^{\circ}\text{K}$	121
Gambar 7.4. Ketergantungan $f(E)$ pada suhu dan energi....	121
Gambar 8.1. Tumpang tindih pita elektron pada unsur logam.....	125
Gambar 8.2. Pemisahan pita elektron pada bahan isolator	126
Gambar 8.3. Pemisahan pita elektron pada zat semikonduktor, (a) banyaknya atom semikonduktor yang berdekatan masih menghasilkan celah pita yang signifikan, (b) banyaknya atom logam yang berdekatan sebagai referensi	127
Gambar 8.4. Kisaran konduktivitas umum untuk isolator, semikonduktor, dan konduktor.....	129
Gambar 8.5. Fungsi distribusi Fermi $F(E)$ versus $(E - E_f)$ untuk berbagai suhu.....	134
Gambar 8.6. Semikonduktor intrinsik. (a) Diagram pita skematik. (b) Kepadatan keadaan. (c) Fungsi distribusi fermi. (d) Konsentrasi pembawa.....	134
Gambar 8.7. Sekema ikatan untuk (a) Si tipe-n dengan donor (arsenik) dan (b) Si tipe-p dengan akseptor (boron).	137
Gambar 8.8. Energi ionisasi terukur (dalam eV) untuk berbagai pengotor dalam Si dan GaAs.	138
Gambar 8.9. Representasi pita energi skematik semikonduktor ekstrinsik dengan (a) ion donordan (b) ion akseptor	139
Gambar 8.10. Semikonduktor tipe n. (a) Diagram pita skematis. (b) Kepadatan keadaan. (c) Fungsi distribusi Fermi. (d) Konsentrasi pembawa. Perhatikan bahwa $np = n^2$	140
Gambar 9.1. Resistansi dalam ohm spesimen merkuri dalam Helium cair terhadap suhu absolut.....	144

Gambar 9.2. (a) Keadaan normal atom kisi pada logam. (b) Keadaan superkonduktor atom kisi pada logam	148
Gambar 9.3. Resistivitas listrik pada logam pada keadaan normal dan superkonduktor.....	149
Gambar 9.4. Diamagnetis sempurna pada superkonduktor.....	150
Gambar 9.5. Efek Meissner dalam bola superkonduktor yang didinginkan dalam medan magnet yang diterapkan secara konstan; pada saat melewati di bawah suhu transisi, garis-garis induksi B dikeluarkan dari bola..	151
Gambar 9.6. Superkonduktor tipe I dimana medan magnet sepenuhnya diusir dari material superkonduktor, memperlihatkan Efek Meissner khas tipe I.....	153
Gambar 9.7. Superkonduktor tipe II, Dimana sebagian medan magnet menembus material dalam bentuk vorteks antara medan kritis pertama (H_{c1} dan medan kritis kedua (H_{c2}).	154

BAB 1

STRUKTUR KRISTAL

Oleh Fahmy Rinanda Saputri

1.1 Struktur Kristal

Fisika zat padat adalah cabang ilmu fisika yang mengkaji susunan atom dan perilaku elektron dalam berbagai struktur kristal. Studi tentang kristal telah mengalami perkembangan signifikan sejak awal abad ke-20, terutama setelah penemuan difraksi sinar-X yang membuka jalan bagi penelitian mendalam mengenai struktur internal kristal. Dengan metode difraksi sinar-X, ilmuwan dapat memprediksi sifat-sifat kristal melalui perhitungan yang relatif sederhana, memungkinkan pemahaman mendalam tentang bagaimana kristal terbentuk, berkembang, dan mempertahankan stabilitasnya di berbagai kondisi (Astra & Sugihartono, 2017).

Secara umum, kristal adalah material di mana atom, molekul, atau partikel-partikel penyusunnya terikat kuat oleh energi potensial rendah, membentuk pola geometris tertentu. Kristal ideal tersusun dari unit-unit penyusun yang berulang secara periodik dalam tiga dimensi. Dalam susunan ini, setiap atom atau molekul menempati posisi tetap yang disebut titik kisi. Struktur geometris ini dikategorikan sebagai kristal sempurna jika memenuhi kriteria berikut: ukurannya tak terhingga, bebas dari cacat geometris, murni dari ketidakmurnian kimia, dan pada suhu $T > 0$ K, atom-atomnya tidak mengalami getaran termal (Wati & Dewantara, 2023).

Setiap kristal tersusun dari pola kisi tertentu, yaitu sekumpulan titik dalam ruang yang tersusun identik dalam setiap arah pandang. Pola ini dikenal sebagai struktur kisi kristal dan terbagi menjadi dua jenis utama: kisi Bravais dan kisi non-Bravais. Kisi Bravais adalah tipe khusus di mana semua titiknya berada pada posisi yang setara secara geometris, dengan jarak yang sama antara titik-titik tetangga. Sementara itu, kisi non-Bravais memiliki susunan titik yang tidak beraturan dan tidak memiliki kesetaraan geometris yang sama.

Kisi kristal merupakan susunan geometris dari atom, ion, atau molekul yang berulang dalam pola tiga dimensi untuk membentuk struktur material yang teratur. Tipe-tipe kisi kristal berbeda dalam bentuk geometrisnya, yang pada gilirannya memengaruhi sifat fisik dan kimia dari material tersebut. Struktur kisi yang berbeda dapat menghasilkan perbedaan dalam kerapatan, titik leleh, kekuatan, konduktivitas listrik, dan sifat magnetik suatu material. Hal ini menjadikan jenis-jenis kisi kristal relevan dalam berbagai aplikasi industri dan teknologi.

1.2 Jenis-jenis Kisi Kristal

Salah satu tipe kisi kristal yang paling sederhana adalah kisi kubik, yang memiliki bentuk simetris dengan tiga sumbu yang saling tegak lurus dan panjang sisi yang sama. Kisi kubik ini terbagi lagi menjadi beberapa jenis, seperti kubik sederhana, kubik berpusat badan (*body-centered cubic/BCC*), dan kubik berpusat muka (*face-centered cubic/FCC*). Dalam kisi kubik sederhana, atom-atom terletak di setiap sudut kubus. Pada BCC, terdapat tambahan atom di tengah-tengah kubus, sementara pada FCC, setiap muka kubus memiliki atom di tengah-tengahnya. Masing-masing jenis kubik ini memiliki perbedaan dalam kerapatan dan distribusi atom, yang berpengaruh pada sifat mekanik dan termal material.

Selain kubik, terdapat juga kisi tetragonal, yang mirip dengan kubik tetapi memiliki salah satu sumbu dengan panjang yang berbeda, sehingga membentuk prisma persegi panjang. Tipe ini sering ditemui pada material yang memiliki sifat anisotropik, di mana sifat fisiknya bergantung pada arah tertentu dalam kristal. Ada juga kisi heksagonal, yang memiliki simetri enam kali lipat pada bidang horisontal, dengan atom yang tersusun dalam lapisan berlapis-lapis. Struktur heksagonal ini umum pada logam-logam seperti magnesium dan titanium, serta menghasilkan material dengan kekuatan tinggi dan stabilitas struktural yang baik.

Jenis-jenis kisi kristal lainnya meliputi kisi ortorombik, rhombohedral, dan monoklinik. Setiap jenis memiliki pola penyusunan atom dan simetri yang berbeda, memberikan karakteristik unik pada masing-masing material. Sebagai contoh, kisi ortorombik memiliki tiga sumbu yang tegak lurus tetapi dengan

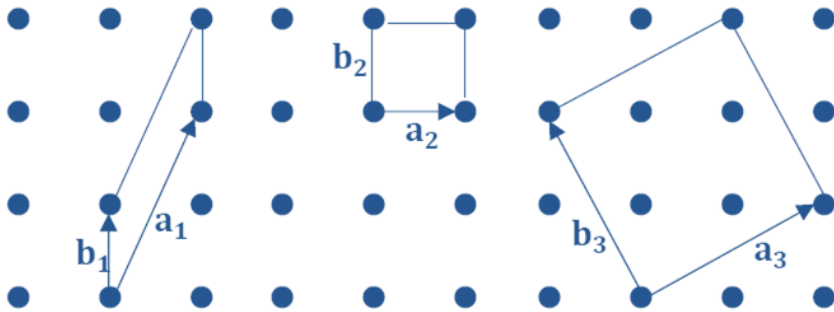
panjang yang berbeda pada setiap sumbu. Struktur ini dapat menghasilkan sifat elastis dan termal yang berbeda jika dibandingkan dengan struktur kubik atau tetragonal.

Dalam pembahasan jenis-jenis kisi kristal, beberapa rumus dasar sering digunakan untuk menghitung berbagai parameter penting, seperti jarak antar atom, volume sel satuan, dan kerapatan atom. Rumus-rumus ini sangat berguna dalam memprediksi bagaimana atom berinteraksi satu sama lain dalam kristal dan bagaimana sifat-sifat material muncul dari struktur ini. Misalnya, jarak antar atom dalam kisi kubik berpusat muka (FCC) dapat dihitung berdasarkan panjang sisi kubus (a) dan dikenal dengan rumus $d = \frac{a}{\sqrt{2}}$, di mana d adalah jarak antar atom yang berdekatan. Demikian pula, perhitungan rapat kemasan atom dalam suatu struktur kristal seringkali memerlukan rumus untuk volume sel satuan dan jumlah atom dalam setiap sel.

1.3 Basis dan Vektor Primitif

Untuk memahami lebih lanjut, struktur kristal dapat diwakili dengan konsep basis dan vektor primitif. Basis adalah kumpulan atom yang diletakkan pada setiap titik kisi untuk membentuk struktur kristal yang sesungguhnya. Dalam kisi dua dimensi, posisi setiap titik penyusun dapat diwakili oleh kombinasi linier dua vektor basis (**a** dan **b**), sehingga kedudukan titik tersebut dapat dinyatakan sebagai $\mathbf{R} = n\mathbf{a} + m\mathbf{b}$, dengan n dan m adalah bilangan bulat. Vektor-vektor ini dikenal sebagai vektor primitif, yang menciptakan pola berulang dalam ruang kristal.

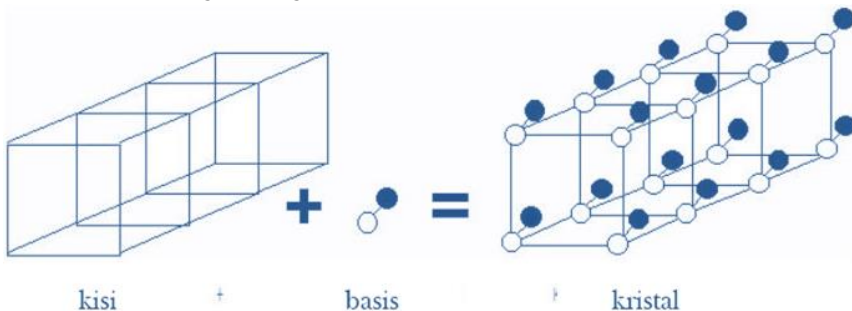
Sel satuan adalah wilayah terkecil dalam kisi yang jika disusun berulang-ulang dapat memenuhi seluruh ruang kristal. Sel unit ini terbagi menjadi sel primitif dan non-primitif. Sel primitif hanya memiliki titik-titik kisi pada sudut-sudutnya dan memiliki volume paling kecil dibandingkan sel unit lainnya. Jika sel primitif diatur dalam pola tertentu, ia akan menutupi seluruh kisi. Luas atau volume sel primitif selalu sama, terlepas dari pemilihan vektor translasinya. Sebaliknya, sel non-primitif memiliki lebih banyak titik kisi dalam setiap sel, menghasilkan volume yang lebih besar.



Gambar 1.1. Ilustrasi Sel Satuan dan Primitif
 Sumber : (Dra. Wiendartun, n.d.)

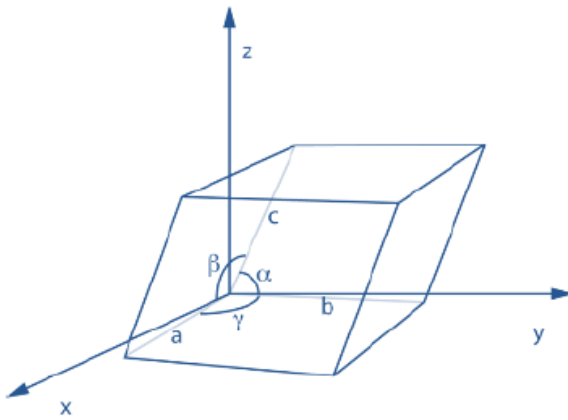
Gambar 1.1 menunjukkan konsep sel satuan dan sel primitif dalam struktur kisi kristal dua dimensi. Sel satuan adalah unit terkecil yang dapat diulang dalam seluruh arah untuk membentuk keseluruhan kisi kristal. Pada gambar, sel satuan ditunjukkan oleh persegi di tengah dengan vektor-vektor basis a_2 dan b_2 , yang merepresentasikan susunan periodik dari titik-titik kisi.

Sel primitif, di sisi lain, adalah bagian terkecil dari kisi yang jika diulang secara terus-menerus juga akan membentuk keseluruhan kisi. Sel primitif memiliki luas atau volume yang lebih kecil dibandingkan sel satuan dan hanya mencakup satu titik kisi per sel. Dalam gambar ini, sel primitif digambarkan oleh dua jenis bentuk pada sisi kiri dan kanan, masing-masing dengan vektor basis a_1 dan b_1 atau a_3 dan b_3 .

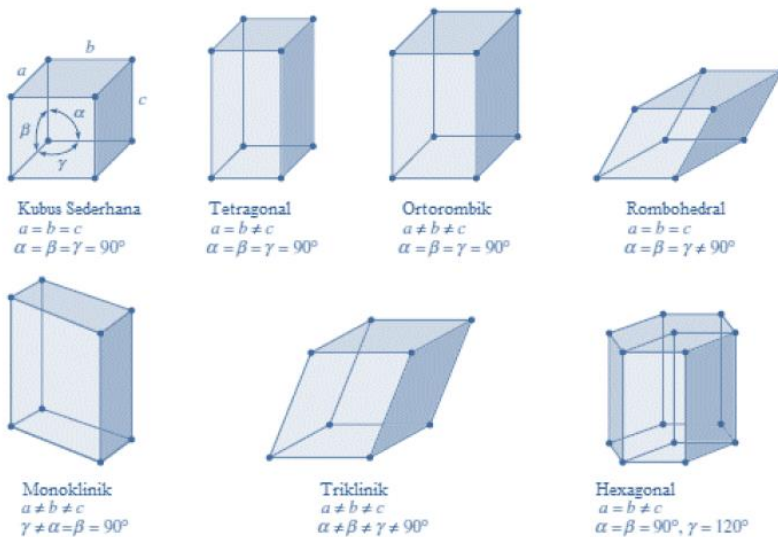


Gambar 1.2. Ilustrasi Pembentukan Struktur Kristal
 Sumber : (Wati & Dewantara, 2023)

Gambar 1.2 menjelaskan konsep dasar pembentukan struktur kristal melalui kombinasi antara kisi dan basis. Kisi, yang terletak di sebelah kiri, adalah struktur geometris tiga dimensi dari titik-titik yang tersusun secara periodik dan berfungsi sebagai kerangka tanpa mengandung atom. Di tengah gambar, basis ditampilkan sebagai kumpulan atom yang ditempatkan pada setiap titik kisi, yang dapat terdiri dari satu atau lebih jenis atom. Ketika basis ini diletakkan di setiap titik kisi, di sebelah kanan, terbentuklah struktur kristal yang sesungguhnya, menciptakan pola tiga dimensi yang berulang. Proses ini menunjukkan bahwa struktur kristal bergantung pada kedua elemen ini, di mana kisi menentukan pola ruang, sementara basis memberikan komposisi atomik yang spesifik. Memahami interaksi antara kisi dan basis sangat penting dalam ilmu material, karena hal ini membantu memprediksi sifat fisik material, seperti kerapatan, titik leleh, dan konduktivitas listrik, yang relevan dalam aplikasi semikonduktor, logam, dan keramik. Struktur kristal dapat dijelaskan dalam model tiga dimensi dengan memperkenalkan konsep sumbu-sumbu kristalografi yang mencerminkan sifat simetri suatu kristal. Ini ditunjukkan melalui parameter a , b , c , serta sudut α , β , dan γ (lihat Gambar I.3). Dalam gambar tersebut, panjang rusuk a ditampilkan sepanjang sumbu x , panjang rusuk b sepanjang sumbu y , dan panjang rusuk c sepanjang sumbu z . Sementara itu, sudut α , β , dan γ masing-masing menunjukkan besar sudut antara sumbu zy , xz , dan xy . Parameter a , b , dan c merepresentasikan panjang rusuk dari sebuah kristal, sedangkan α , β , dan γ menggambarkan sudut perpotongan antara rusuk yang berbeda. Dari parameter tiga dimensi ini atau 3D, unit sel dapat ditentukan, membentuk tujuh jenis unit sel yang dikenal sebagai tujuh sistem kristal dasar, di mana titik-titik kisi terletak di sudut unit sel tersebut, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar I.4.



Gambar 1.3. Parameter Model Kisi 3D
Sumber : (Wati & Dewantara, 2023)



Gambar 1.4. Sistem Kristal Dasar
Sumber : (Wati & Dewantara, 2023)

Sistem kisi kristal ini meliputi beberapa tipe dasar, seperti kisi miring, kisi bujur sangkar, kisi heksagonal, kisi segi panjang, dan kisi segi panjang berpusat (Dra. Wiendartun, n.d.). Menurut Gambar 1.4, posisi titik kisi dapat ditempatkan tidak hanya pada sudut, tetapi

juga di sisi-sisi unit sel, termasuk permukaan dan bagian tengah atau badan kisi. Bravais (1850) mengidentifikasi empat tipe unit sel yang termasuk dalam tujuh sistem kristal dasar: unit sel sederhana (*simple*), pusat badan (*body centered*), pusat muka (*face centered*), dan pusat alas (*base centered*).

1.4 Simetri Kristal

Simetri kristal merujuk pada keseragaman dan keteraturan yang terdapat dalam struktur kristal, yang dapat diidentifikasi melalui berbagai elemen simetri. Elemen-elemen ini mencakup sumbu rotasi, bidang refleksi, dan pusat simetri, yang semuanya berkontribusi pada penentuan bagaimana struktur kristal terlihat dan berperilaku.

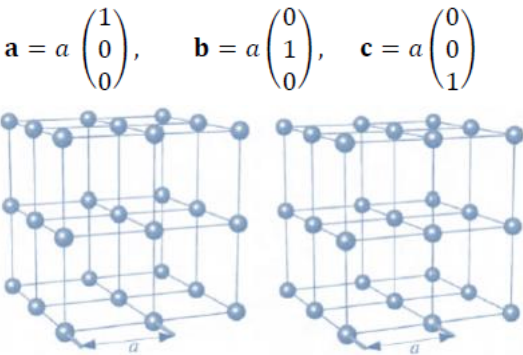
Sumbu rotasi adalah garis imajiner di mana kristal dapat diputar dengan sudut tertentu (seperti 90° , 120° , 180°) dan masih tampak sama. Contohnya, sumbu rotasi tiga kali (3-fold axis) memungkinkan rotasi 120° tanpa mengubah penampilan struktur. Sementara itu, bidang refleksi adalah permukaan yang membagi kristal menjadi dua bagian yang merupakan cerminan satu sama lain. Jika kita menggambar bidang refleksi melalui struktur kristal, kedua sisi akan menunjukkan pola yang identik. Pusat simetri, di sisi lain, adalah titik di mana untuk setiap atom atau elemen dalam struktur, ada atom atau elemen yang identik pada jarak yang sama tetapi berlawanan arah, memberikan keseimbangan dalam distribusi atom di seluruh kristal.

Simetri kristal dapat dikategorikan menjadi tujuh sistem kristal dasar, yaitu sistem kubus, sistem tetragonal, sistem ortogonal, sistem heksagonal, sistem triklin, sistem monoklin, dan sistem rombohedral (trigonal). Sistem kubus memiliki simetri tinggi dengan banyak sumbu rotasi dan bidang refleksi. Sistem tetragonal memiliki dua sumbu yang sama panjang dan satu sumbu yang berbeda, dengan simetri yang sedikit lebih rendah. Sistem ortogonal memiliki tiga sumbu dengan panjang yang berbeda dan sudut yang saling tegak lurus (90°). Sistem heksagonal memiliki satu sumbu panjang yang diapit oleh dua sumbu yang sama panjang pada sudut 120° . Sistem triklin memiliki panjang sumbu dan sudut yang tidak sama, sehingga simetrinya paling rendah, sedangkan sistem

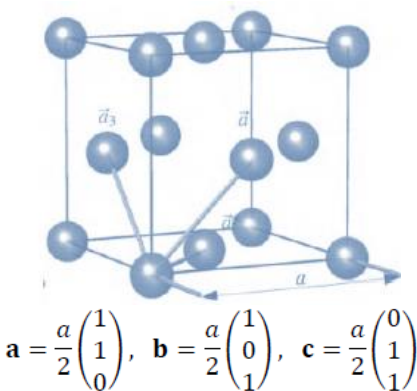
monoklin memiliki dua sumbu yang saling tegak lurus dan satu sumbu dengan sudut yang berbeda. Sistem rombohedral memiliki tiga sumbu dengan panjang yang sama tetapi sudut yang berbeda.

Simetri dalam kristal tidak hanya memberikan keindahan visual tetapi juga memengaruhi sifat fisik dan kimia material tersebut, termasuk kekuatan, titik leleh, dan perilaku optik. Memahami simetri kristal sangat penting dalam ilmu material, fisika, dan kristalografi untuk meramalkan dan menjelaskan perilaku material pada tingkat atom.

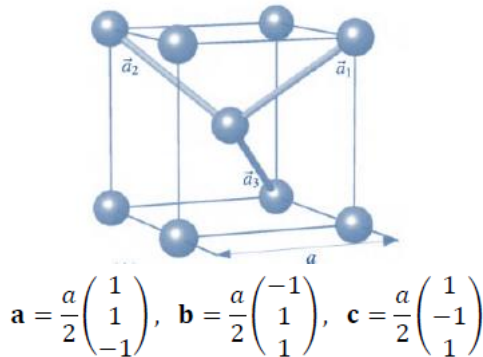
Konfigurasi kristal dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 1.5. Kisi Kubus Sederhana
 Sumber : (Wati & Dewantara, 2023)



Gambar 1.6. Kisi FCC
 Sumber : (Wati & Dewantara, 2023)



Gambar 1.7. Kisi BCC

Sumber : (Wati & Dewantara, 2023)

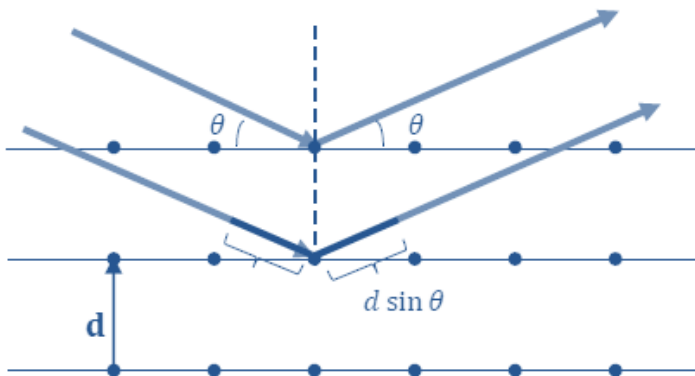
1.5 Difraksi Kristal

Difraksi pada kristal adalah fenomena yang terjadi ketika gelombang, seperti cahaya atau sinar X, melewati atau berinteraksi dengan struktur periodik dalam kristal. Fenomena ini terjadi akibat interaksi antara gelombang dan atom-atom dalam kisi kristal, yang menghasilkan pola interferensi yang dapat diamati.

Dasar difraksi terjadi ketika gelombang menemui penghalang atau celah yang memiliki ukuran sebanding dengan panjang gelombang gelombang tersebut. Dalam konteks kristal, kisi atom bertindak sebagai penghalang yang dapat menyebarkan gelombang. Setiap atom dalam kristal dapat dianggap sebagai sumber gelombang sekunder yang berinterferensi satu sama lain.

Hukum Bragg merupakan dasar dari difraksi kristal, yang dinyatakan sebagai $n\lambda = 2d \sin \theta$.

Dalam rumus ini, n adalah urutan difraksi, λ adalah panjang gelombang gelombang yang difraksi, d adalah jarak antar lapisan atom dalam kristal, dan θ adalah sudut difraksi. Hukum ini menjelaskan kondisi di mana interferensi konstruktif terjadi, menghasilkan puncak intensitas pada pola difraksi. Ilustrasi difraksi kristal yang mana berkas sinar-x menumbruk atom.



Gambar 1.8. Ilustrasi Difraksi kristal

Sumber : (Wati & Dewantara, 2023)

Ketika cahaya atau sinar X melewati kristal, pola difraksi yang dihasilkan akan tergantung pada struktur kristal dan sudut incidence. Pola ini dapat dilihat sebagai serangkaian titik atau garis terang dan gelap di layar deteksi, yang mengandung informasi mengenai jarak antar lapisan atom dan simetri struktur kristal.

Hukum Laue menjelaskan fenomena difraksi gelombang pada kristal, di mana gelombang yang datang (dengan vektor gelombang k) dipantulkan menjadi gelombang pantul (dengan vektor gelombang k'). Dalam hal ini, panjang gelombang gelombang datang dan pantul adalah sama, tetapi momentum partikel tidak konstan, dan perbedaan energi yang dihasilkan diserap oleh kristal.

Besaran $kd \sin \theta$ disebut lintasan optik, yang menunjukkan sejauh mana gelombang mengalami pergeseran saat melalui suatu medium. Interferensi konstruktif antara gelombang atas dan bawah terjadi ketika perbedaan fase antara keduanya adalah kelipatan dari 2π . Dengan demikian, perbedaan dalam vektor gelombang dapat dinyatakan sebagai:

$$\Delta k \cdot d = 2\pi n$$

di mana n adalah bilangan bulat. Persamaan ini menunjukkan kondisi yang diperlukan untuk terjadinya interferensi konstruktif, di mana Δk adalah perbedaan antara vektor gelombang datang dan pantul. Hukum ini penting dalam

studi struktur kristal dan difraksi, karena memberikan informasi mengenai jarak antar bidang kristal dan sifat-sifat material.

Difraksi pada kristal memiliki banyak aplikasi dalam ilmu material dan fisika. Misalnya, difraksi sinar X digunakan untuk menentukan struktur kristal, mengidentifikasi posisi atom dalam kisi, dan memahami sifat fisik material. Selain itu, teknik seperti difraksi neutron dan difraksi elektron juga digunakan untuk menganalisis struktur bahan, serta dalam penelitian pengembangan material baru dengan karakteristik tertentu.

1.6 Cacat Kristal

Cacat kristal merujuk pada ketidaksempurnaan dalam struktur kristal yang dapat mempengaruhi sifat fisik dan mekanik material. Cacat ini bisa terjadi pada berbagai tingkat, mulai dari tingkat atom hingga tingkat makroskopis.

Cacat titik adalah cacat yang terjadi pada posisi individu atom dalam kisi kristal. Jenis cacat titik yang umum meliputi vakansi, yaitu kehilangan atom dari posisi kisi yang menciptakan ruang kosong; interstitial, di mana atom tambahan berada di antara posisi kisi yang tidak biasanya ditempati; dan substitusi, di mana atom yang berbeda menggantikan posisi atom asli dalam kisi. Cacat titik dapat mempengaruhi difusi atom dalam material dan memodifikasi sifat mekanik, seperti kekuatan dan keuletan.

Cacat garis, atau dislokasi, adalah cacat yang melibatkan barisan atom dalam kisi. Dislokasi tipe edge terjadi ketika ada ekstra setengah bidang atom yang disisipkan ke dalam kisi, menyebabkan distorsi pada barisan atom di sekitarnya. Sementara dislokasi tipe screw terjadi ketika ada pergeseran pada barisan atom, membentuk spiral dalam struktur kristal. Dislokasi sangat penting dalam mekanika material, karena memungkinkan deformasi plastis pada material dengan cara yang relatif mudah dibandingkan dengan pemisahan seluruh barisan atom.

Cacat permukaan adalah ketidaksempurnaan yang terjadi pada batas permukaan kristal, yang mencakup batas butir di mana dua kristal dengan orientasi berbeda bertemu, serta tepi yang menunjukkan ketidakteraturan di permukaan material. Cacat

permukaan dapat mempengaruhi reaksi kimia dan sifat fisik, seperti kekerasan dan ketahanan korosi.

Cacat volume mencakup ketidaksempurnaan yang lebih besar, seperti rongga, inklusi, atau ketidakaturan dalam struktur kristal yang lebih besar. Cacat ini dapat mempengaruhi sifat makroskopis material, seperti kerapatan dan konduktivitas termal.

Dampak cacat kristal dapat signifikan terhadap sifat material. Cacat seperti dislokasi dapat meningkatkan deformasi plastis, yang memengaruhi kekuatan dan ketahanan kelelahan material. Selain itu, cacat titik dapat mempengaruhi laju difusi serta konduktivitas listrik atau termal. Cacat permukaan dapat meningkatkan reaktivitas material dengan lingkungan, mempengaruhi proses korosi atau katalisis.

DAFTAR PUSTAKA

- Astra, I. M., & Sugihartono, I. (2017). *Pengantar Fisika Zat Padat (Edisi 2)*. Universitas Terbuka.
- Dra. Wiendartun, M. S. (n.d.). *Pendahuluan fisika zat padat*.
- Wati, M., & Dewantara, D. (2023). *PENDAHULUAN FISIKA ZAT PADAT*. Lambung Mangkurat University Press.

BAB 2

IKATAN KIMIA DALAM KRISTAL

Oleh Kurniati Abidin

2.1 Pendahuluan

Setelah mengetahui struktur kristal, selanjutnya akan dibahas berbagai mekanisme yang mengarah pada ikatan antar atom sehingga membentuk kristal. Ikatan ionik, kovalen atau logam hanyalah kasus pembatas yang diidealkan, seringkali ditemukan jenis ikatan campuran, misalnya, kombinasi ikatan logam dan kovalen pada logam transisi.

Seperti dalam kimia konvensional, hanya sebagian kecil elektron yang disebut elektron valensi, yang berpartisipasi dalam ikatan. Ini adalah elektron-elektron di kulit terluar atom. Elektron dalam kulit dalam atau elektron inti, terikat sangat erat ke inti sehingga energi dan fungsi gelombangnya hampir tidak dipengaruhi oleh keberadaan atom lain di lingkungannya.

Selain itu, terdapat interaksi elektrostatik yang menarik antara muatan negatif elektron dan muatan positif inti yang sepenuhnya bertanggung jawab atas kohesi padatan. Gaya magnetik hanya memiliki efek yang lemah pada kohesi, dan gaya gravitasi dapat diabaikan.

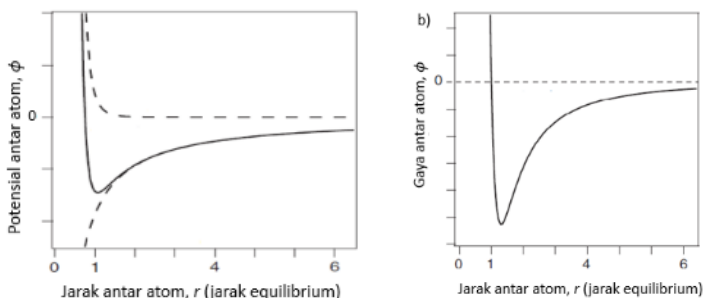
Energi kohesi kristal didefinisikan sebagai energi yang harus ditambahkan ke kristal untuk memisahkan komponen-komponennya menjadi atom-atom bebas netral dalam keadaan diam, pada pemisahan tak terbatas, dengan konfigurasi elektronik yang sama. Istilah energi kisi digunakan dalam pembahasan kristal ionik dan didefinisikan sebagai energi yang harus ditambahkan ke kristal untuk memisahkan ion-ion komponennya menjadi ion-ion bebas dalam keadaan diam pada pemisahan tak terbatas.

Dua gaya yang berbeda harus ada untuk membentuk ikatan dalam padatan atau dalam molekul. Gaya tarik-menarik diperlukan untuk setiap ikatan. Berbagai jenis gaya tarik-menarik dibahas di bagian berikut. Sebaliknya, gaya tolak-menolak diperlukan untuk

menjaga agar atom-atom tidak terlalu dekat satu sama lain. Persamaan sederhana **potensial antar atom** dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\phi(r) = \frac{A}{r^n} - \frac{B}{r^m}$$

dimana r adalah jarak antara atom-atom dan $n > m$ yaitu bagian tolak-menolak untuk jarak pendek (kadang diasumsikan sebagai potensial tolak eksponensial). Pada jarak pendek antar atom, gaya tolakan yang kuat muncul, seperti pada gambar 2.1. Gaya ini berasal dari fakta bahwa dua atom tidak dapat “berada terlalu dekat” satu sama lain tanpa adanya tolakan kuat.



Gambar 2.1. a). Potensial antar atom untuk ikatan pada zat padat dengan $n = 6$ dan $m = 1$, b) Gaya yang dihasilkan $-\text{grad}\phi(r)$ (Sumber : Hofmann, 2015)

Prinsip eksklusif Pauli menyatakan bahwa dua elektron tidak dapat berada dalam keadaan kuantum yang sama. Ketika dua atom berada sangat dekat, awan elektron mereka saling tumpang tindih. Untuk menjaga agar mereka tidak berada dalam keadaan kuantum yang sama, fungsi gelombang elektron dari masing-masing atom harus diubah sehingga mereka menjadi ortogonal (saling tegak lurus dalam ruang vektor kuantum), dan ini membutuhkan energi tambahan.

Proses ortogonalisasi ini memerlukan energi tambahan, sebab mengubah konfigurasi elektron untuk menghindari tumpang tindih yang memaksa sistem memasuki keadaan energi yang lebih tinggi. Kenaikan energi ini menghasilkan gaya tolakan yang kuat, terutama pada jarak pendek. Akibatnya, tolakan ini menjadi penghalang yang

mencegah dua atom saling mendekat lebih jauh, sehingga mereka tidak dapat berbagi ruang yang sama untuk awan elektronnya.

2.2 Jenis-jenis Ikatan dalam Kristal

2.2.1 Ikatan Ionik

Ikatan ionik terbentuk melalui transfer elektron dari atom yang cenderung melepaskan elektron (elektropositif) ke atom yang cenderung menerima elektron (elektronegatif). Transfer ini menghasilkan dua ion bermuatan berlawanan yang saling menarik melalui gaya Coulomb, yaitu gaya tarik elektrostatik antara muatan positif dan negatif.

Untuk membentuk ion, diperlukan energi. Dalam kasus senyawa NaCl, atom natrium (Na) membutuhkan energi ionisasi sebesar 5,1 eV untuk melepaskan elektronnya, sementara atom klorin (Cl) melepaskan energi sebesar 3,6 eV saat menerima elektron, yang disebut sebagai afinitas elektron. Maka, besar energi untuk membentuk sebarang ion Na^+ dan Cl^- adalah 5,1 eV (energi yang dibutuhkan) dikurangi 3,6 eV (energi yang dilepaskan), menghasilkan energi sebesar 1,5 eV. (Hoffman, 2015).

Namun, energi ini dikompensasi oleh energi yang dihasilkan oleh gaya tarik Coulomb antar ion-ion tersebut. Dalam kristal NaCl, ion Na^+ dan Cl^- dipisahkan dengan jarak sekitar 0,28 nm (sesuai dengan jarak antar ion dalam struktur kristalnya). Energi potensial Coulomb antara dua ion tersebut adalah $-\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a}$, dimana a adalah jarak antar ion. Untuk pasangan NaCl, nilai ini adalah -5,1 eV. Jadi, energi yang diperoleh dari interaksi Coulomb lebih besar dari energi yang dikeluarkan untuk membentuk ion, membuat ikatan ionik ini stabil secara energi.

Dengan mengetahui struktur kristal NaCl, kita dapat menghitung energi elektrostatik total yang diperoleh dalam pembentukan kristal tersebut. Sebuah ion Na^+ yang berada di pusat sebuah kubus NaCl. Ion ini dikelilingi oleh enam ion Cl^- pada jarak $a = 0,28 \text{ nm}$, yang memberikan energi tarik menarik elektrostatik sebesar $-\frac{6e^2}{4\pi\epsilon_0 a}$.

Di lapisan selanjutnya, pada jarak lebih besar, yaitu $a\sqrt{2}$, terdapat 12 ion Na^+ yang memberikan kontribusi energi tolak menolak sebesar $\frac{12e^2}{4\pi\epsilon_0 a\sqrt{2}}$. Kemudian, terdapat delapan ion Cl^- lagi pada jarak berikutnya, yang kembali memberikan kontribusi energi tarik menarik. Rangkaian perhitungan energi ini terus berlanjut, mencakup setiap lapisan ion-ion yang terletak pada jarak yang berbeda dari ion pusat, dan secara matematis, deret energi ini akhirnya menyatu menuju suatu nilai total energi elektrostatis yang stabil untuk ion Na^+ di dalam kristal. Nilai ini dinyatakan sebagai:

$$E_{Na} = -1,748 \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a} = -M \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a}$$

Dimana M adalah konstant Madelung, yang mewakili pengaruh gabungan dari seluruh ion dalam struktur kristal NaCl, dengan nilai sekitar 1,748 untuk kisi kristal NaCl. Konstanta ini menunjukkan bahwa energi elektrostatis dalam kisi lebih besar daripada energi interaksi elektrostatis dari hanya dua ion yang terisolasi, seperti pasangan Na^+ dan Cl^- . Karena itu, nilai M lebih dari 1.

Untuk menghitung total energi elektrostatis untuk seluruh mol NaCl, dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$E = -N_A \frac{M_d e^2}{4\pi\epsilon_0 a}$$

dengan N_A adalah bilangan avogadro, yang memungkinkan kita menghitung energi untuk 1 mol ion. Dan faktor $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a}$ adalah energi interaksi Coulomb per pasangan ion Na^+ dan Cl^- pada jarak a dalam kisi kristal. Faktor ini dikali 2 untuk memperhitungkan kedua jenis ion (Na^+ dan Cl^-) dan membaginya kembali dengan 2 untuk menghindari penghitungan ganda dari pasangan yang sama.

Definisi tersebut dapat dikontribusikan pada keseimbangan energi untuk membentuk zat padat. Energi kohesif adalah perbedaan energi total antara zat padat dalam bentuk kristal dan atom-atom penyusunnya yang terisolasi. Dengan kata lain, ini adalah energi yang diperlukan untuk memisahkan semua atom dalam kristal menjadi atom bebas atau atom gas. Dalam konteks

kristal ionik, energi kohesif mewakili kekuatan ikatan antara ion-ion positif dan negatif di dalam struktur kristal.

Untuk menghitung energi kohesi kristal ionik, langkah pertama adalah menghitung berapa banyak energi yang dibutuhkan untuk mengubah atom menjadi ion, yaitu melepas elektron dari atom logam (menggunakan energi ionisasi) dan menambahkan elektron ke atom non-logam (menggunakan keelektronegatifan atau afinitas elektron atom). Setelah atom-atom diubah menjadi ion, kita perlu menghitung energi elektrostatik total yang dihasilkan ketika ion-ion tersebut tersusun dalam struktur kristal. Ini dikenal sebagai energi kisi.

Energi kisi adalah energi yang dilepaskan ketika ion-ion membentuk struktur kristal dari keadaan ion yang terpisah. Nilai ini ditentukan berdasarkan interaksi elektrostatik antara ion-ion yang bermuatan berlawanan dalam kisi kristal. Semakin kuat interaksi elektrostatik antar ion, semakin besar energi kisi.

Energi kohesif dihitung dengan mengurangi energi yang dibutuhkan untuk membentuk ion dari atom netral (yaitu energi ionisasi dan keelektronegatifan) dari energi kisi yang dihasilkan oleh susunan ion-ion dalam kristal. Secara matematis:

$$\text{Energi Kohesif} = \text{Energi Kisi} - (\text{Energi Ionisasi} + \text{Energi Afinitas Elektron})$$

dengan demikian, energi kohesif menunjukkan total keseimbangan energi untuk kristal, setelah mempertimbangkan energi yang dilepaskan saat pembentukan kisi dan energi yang diinvestasikan untuk membentuk ion.

Energi kohesi ini sangat penting untuk memahami kestabilan dan kekuatan ikatan dalam padatan, karena semakin tinggi energi kohesi, semakin stabil kristal ionik yang terbentuk.

2.2.2 Ikatan Kovalen

Ikatan kovalen dalam konteks fisika zat padat melibatkan pembagian elektron antara atom-atom, yang membentuk ikatan yang sangat stabil. Kasus yang paling sederhana dapat ditemukan dalam molekul hidrogen (H_2), dimana dua atom hidrogen berbagi satu pasang elektron, elektron bersama ini menciptakan gaya tarik yang menyatukan kedua atom.

Dalam padatan, ikatan kovalen umumnya ditemukan pada elemen yang kulit terluarnya hampir setengah penuh, seperti karbon. Karbon dapat membentuk beberapa struktur padat berbeda yang terkenal, seperti berlian, grafena, dan grafit, serta molekul yang lebih kompleks seperti Buckminster Fullerene (C_{60}) dan Carbon Nanotube.

Dalam struktur berlian, ikatan kovalen terbentuk melalui kombinasi linier dari satu orbital $2s$ dan tiga orbital $2p$ pada setiap atom karbon. Kombinasi ini menghasilkan empat orbital hibrida yang disebut sp^3 . Orbital sp^3 ini terorientasi dalam bentuk tetrahedral, memungkinkan setiap atom karbon untuk membentuk empat ikatan kovalen yang kuat dengan atom karbon lainnya dengan pola tiga dimensi. Struktur ini sangat kuat dan stabil karena ikatan yang terbentuk adalah ikatan yang sangat terarah dan mengikat dengan kuat.

Pada struktur grafena dan grafit, karbon mengadopsi ikatan kovalen yang berbeda. Di sini, orbital $2s$ digabungkan dengan dua dari tiga orbital $2p$ menghasilkan tiga orbital sp^2 . Orbital sp^2 ini semuanya terletak dalam satu bidang dan membentuk 120° satu sama lain. Konfigurasi ini memungkinkan karbon membentuk ikatan dalam dua dimensi, seperti grafena, dimana lapisan-lapisan atom karbon terikat secara planar.

Selain tiga orbital sp^2 , terdapat satu orbital p yang tidak berikatan (non-bonding) yang tegak lurus terhadap bidang ini. Dalam grafit, elektron dalam orbital p ini memungkinkan konduktivitas listrik di sepanjang lapisan, karena elektron bebas dapat bergerak antara lapisan-lapisan.

Ikatan kovalen memiliki sifat yang sangat terarah karena konfigurasi orbital yang spesifik. Hal ini menyebabkan struktur ikatan yang kaku dan stabil, seperti pada berlian dan grafena. Selain itu, ikatan kovalen sangat stabil dengan energi kohesif yang tinggi, biasanya berada dalam beberapa elektron volt (eV) per atom. Ini berarti padatan kovalen, seperti berlian, memiliki kekuatan ikatan yang signifikan dan sifat tahan panas.

Ikatan kovalen dalam padatan ini menciptakan struktur yang unik dan beragam dengan sifat yang sangat berbeda, bergantung pada orientasi dan jenis orbital yang berpartisipasi dalam ikatan.

Pembentukan ikatan kovalen dalam molekul hidrogen (H_2) dapat dijelaskan menggunakan mekanika kuantum dengan pendekatan fungsi gelombang dan Hamiltonian. Molekul H_2 terbentuk dari dua atom hidrogen yang posisinya berada pada $\mathbf{R}_A$ dan $\mathbf{R}_B$, dengan jarak antara keduanya sebesar $R = |\mathbf{R}_B - \mathbf{R}_A|$. Setiap atom hidrogen memiliki fungsi gelombang keadaan dasar masing-masing, yang disebut ϕ_A untuk atom pada inti A dan ϕ_B untuk atom pada inti B .

Operator Hamiltonian (H) untuk molekul H_2 menggambarkan total energi sistem dan terdiri dari beberapa bagian:

$$H = -\frac{\hbar^2 \nabla_1^2}{2m_e} - \frac{\hbar^2 \nabla_2^2}{2m_e} + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|} - \frac{1}{|\mathbf{R}_A - \mathbf{r}_1|} - \frac{1}{|\mathbf{R}_B - \mathbf{r}_2|} - \frac{1}{|\mathbf{R}_A - \mathbf{r}_2|} - \frac{1}{|\mathbf{R}_B - \mathbf{r}_1|} \right)$$

dua suku pertama, $-\frac{\hbar^2 \nabla_1^2}{2m_e}$ dan $\frac{\hbar^2 \nabla_2^2}{2m_e}$, adalah energi kinetik dari kedua elektron. Operator ∇ hanya bekerja pada koordinat masing-masing elektron, yaitu $\mathbf{r}_1$ dan $\mathbf{r}_2$. Sedangkan suku-suku berikutnya menggambarkan interaksi elektrostatis antara inti dan elektron.

Istilah elektrostatis mencakup beberapa komponen diantaranya: tolakan antara kedua inti (yang bermuatan positif) pada jarak R , tolakan antara kedua elektron pada jarak $|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|$, serta gaya tarik antara elektron dan setiap inti yang menghasilkan beberapa suku yang melibatkan jarak antara masing-masing inti dan elektron.

Masalah ikatan kovalen dalam molekul hidrogen menjadi lebih rumit karena interaksi elektrostatis antara kedua elektron. Namun, dengan penyederhanaan tertentu, perhitungannya bisa disederhanakan. Seperti, menghilangkan interaksi elektrostatis antar elektron. Dengan menghilangkan interaksi ini, Hamiltonian molekul dapat dipisahkan menjadi dua bagian yang masing-masing mewakili satu elektron. Melalui pendekatan ini, inti hidrogen dianggap tetap dan hanya berkontribusi pada penyeimbang energi keseluruhan. Ini berarti bahwa hanya fokus pada interaksi setiap

elektron dengan intinya dan mempertimbangkan tolakan elektrostatik antar elektron.

Selain itu, penyederhanaan juga dapat dilakukan dengan menyederhanakan Hamiltonian dengan menghilangkan interaksi lainnya. Dalam situasi ini, Hamiltonian untuk molekul hidrogen hanya terdiri dari dua Hamiltonian atom independen, masing-masing untuk satu elektron yang berinteraksi dengan intinya sendiri tanpa pengaruh dari elektron lainnya.

Melalui penyederhanaan Hamiltonian, solusi untuk fungsi gelombang dua elektron dapat direpresentasikan sebagai hasil kali dua fungsi gelombang atom yang independen:

$$\phi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \phi_A(\mathbf{r}_1)\phi_B(\mathbf{r}_2)$$

$\phi_A(\mathbf{r}_1)$ adalah fungsi gelombang dari elektron pertama yang berinteraksi dengan inti **A**, dan $\phi_B(\mathbf{r}_2)$ adalah fungsi gelombang dari elektron kedua yang berinteraksi dengan inti **B**.

Sebenarnya, hal ini kurang tepat karena fungsi gelombang seperti itu, tidak sesuai dengan prinsip Pauli. Prinsip ini menyatakan bahwa tidak ada dua elektron yang dapat berada dalam keadaan kuantum yang sama. Untuk memenuhi prinsip ini, fungsi gelombang total dari sistem dua elektron harus antisimetrik terhadap pertukaran elektron (artinya, jika kita menukar posisi dua elektron, fungsi gelombang harus berubah tanda).

Fungsi gelombang total untuk dua elektron terdiri dari dua bagian: *bagian spasial* (yang menggambarkan posisi mereka) dan *bagian spin* (yang menggambarkan orientasi spin mereka). Untuk memenuhi sifat antisimetrik dapat dilakukan dengan mengkombinasikan bagian spasial dan bagian spin dalam dua cara berbeda, yaitu bagian spasial simetris dan bagian spin antisimetris, serta bagian spasial antisimetris dan bagian spin simetris.

Fungsi gelombang spasial yang memenuhi prinsip Pauli diberikan sebagai berikut:

$$\Psi_{\uparrow\downarrow}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \propto \phi_A(\mathbf{r}_1)\phi_B(\mathbf{r}_2) + \phi_A(\mathbf{r}_2)\phi_B(\mathbf{r}_1)$$

Fungsi ini menggunakan tanda plus (+) dan disebut simetris karena tidak berubah ketika kita menukar elektron.

$$\Psi_{\uparrow\uparrow}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) \propto \phi_A(\mathbf{r}_1)\phi_B(\mathbf{r}_2) - \phi_A(\mathbf{r}_2)\phi_B(\mathbf{r}_1)$$

Fungsi ini menggunakan tanda minus (-), sehingga fungsi gelombang akan berubah tanda ketika kita menukar elektron, yang disebut antisimetris.

Untuk fungsi gelombang spasial simetris (dengan tanda plus), bagian spin harus antisimetris agar total fungsi gelombang tetap antisimetris. Keadaan ini dikenal sebagai keadaan singlet dengan spin total nol. Untuk fungsi gelombang spasial antisimetris (dengan tanda minus), bagian spin harus simetris untuk menghasilkan fungsi gelombang total yang antisimetris. Ini menghasilkan keadaan triplet dengan spin total satu.

2.2.3 Ikatan Logam

Pada logam, elektron valensi tidak terikat kuat pada inti atom, dan tidak ada ion yang sangat elektronegatif untuk menarik elektron-elektron ini, berbeda dengan padatan ionik. Hal ini menyebabkan elektron valensi dalam logam menjadi terdelokalisasi dan bebas bergerak di antara inti atom, yang menjadikannya sebagai elektron konduksi yang penting untuk konduksi listrik.

Logam cenderung terbentuk dari unsur-unsur yang tidak membutuhkan banyak energi untuk menghilangkan elektron valensinya, karena energi yang rendah untuk melepaskan elektron membuat elektron-elektron ini dapat berpindah dengan bebas di antara atom-atom dalam logam. Meskipun energi untuk melepaskan elektron valensi ini rendah, tetap ada sejumlah energi yang dibutuhkan, dan energi ini harus dikompensasi oleh ikatan yang terbentuk di dalam logam.

Dalam logam, ikatan tidak seperti ikatan kovalen atau ionik biasa, sehingga penjelasan intuitif tentang perolehan energi menjadi lebih kompleks. Namun, prinsip utamanya adalah adanya penurunan energi dalam sistem logam. Salah satu sumber penurunan energi adalah energi kinetik elektron konduksi.

Energi kinetik (T) dalam konteks ini diwakili oleh Hamiltonian kinetik:

$$T = -\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m_e}$$

operator ∇^2 (operator Laplacian) mengukur turunan spasial kedua dari fungsi gelombang, yang menunjukkan tingkat kelengkungan

fungsi gelombang. Elemen matriks $\langle \Psi | T | \Psi \rangle$ mewakili energi kinetik rata-rata untuk partikel dengan fungsi gelombang Ψ .

Pada elektron yang terlokalisasi (misalnya dalam atom), fungsi gelombang memiliki kelengkungan yang tinggi, menyebabkan energi kinetiknya lebih besar. Sebaliknya, dalam logam, elektron konduksi yang terdelokalisasi memiliki fungsi gelombang dengan kelengkungan yang lebih rendah, yang berarti energi kinetik rata-ratanya lebih rendah.

Penurunan energi kinetik ini pada elektron terdelokalisasi dalam logam berkontribusi pada stabilitas logam, memungkinkan logam untuk membentuk ikatan dan memberikan energi yang cukup untuk menjaga agar elektron konduksi tetap dalam keadaan bebas bergerak.

Secara keseluruhan, sifat elektron konduksi yang terdelokalisasi di dalam logam mengurangi energi kinetik mereka dibandingkan dengan keadaan terlokalisasi, sehingga menciptakan penurunan energi yang berkontribusi pada kestabilan dan kemampuan logam untuk menghantarkan listrik.

Kontribusi lain terhadap energi elektron adalah energi potensial. Kita mungkin beranggapan bahwa setiap elektron dalam logam tidak mengalami potensial elektrostatik yang signifikan karena ada banyak elektron dan ion yang muatannya saling menetralkan. Namun, pada kenyataannya, setiap elektron mengalami potensial tarik-menarik yang signifikan. Ini disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu prinsip Pauli dan interaksi Coulomb.

Elektron-elektron dengan spin yang sama tidak dapat berada pada posisi yang sama dalam ruang (sesuai prinsip eksklusi Pauli). Hal ini menyebabkan elektron-elektron dengan spin yang sama untuk “saling menjauh”, menciptakan distribusi yang mengurangi tolakan antar elektron dan menghasilkan potensi tarik-menarik efektif.

Selain efek Pauli, ada gaya Coulomb antara elektron yang bermuatan negatif, yang menyebabkan elektron-elektron saling menghindari satu sama lain, meskipun dalam rata-rata mereka masih tetap terikat dalam sistem logam secara keseluruhan.

Mengapa logam menyukai struktur kristal rapat? Struktur rapat (seperti FCC dan HCP) pada logam memiliki beberapa

keuntungan, diantaranya: Tidak memiliki preferensi arah dalam ikatan, ikatan logam tidak memiliki arah spesifik karena sifat elektron konduksi yang terdelokalisasi, berbeda dengan ikatan kovalen yang biasanya terarah. Memaksimalkan tumpang tindih orbital valensi, struktur yang rapat memungkinkan orbital valensi dari atom-atom logam untuk saling tumpang tindih secara maksimal. Ini meningkatkan delokalisasi elektron valensi dan mengurangi energi kinetik elektron secara keseluruhan, yang menghasilkan stabilitas energi. Jumlah tetangga yang maksimal, struktur rapat memberikan atom logam banyak tetangga terdekat, yang memperkuat keadaan elektron terdelokalisasi dan menambah kestabilan sistem secara keseluruhan.

Ikatan logam umumnya lebih lemah dibandingkan ikatan kovalen atau ionik, dengan energi ikatan beberapa elektron volt per atom. Namun, logam transisi memiliki ikatan yang lebih kuat dibandingkan logam lainnya.

Pada logam transisi, terdapat ikatan campuran antara elektron valensi yang berbeda: Elektron s dan p pada logam transisi bersifat terdelokalisasi, seperti halnya dalam logam biasa, berfungsi sebagai elektron konduksi. Elektron d yang sebagian terisi, cenderung menciptakan ikatan yang lebih mirip dengan ikatan kovalen, yang lebih terlokalisasi dan kuat. Hal ini menjelaskan mengapa logam transisi sering memiliki energi ikatan yang lebih tinggi dibandingkan logam lain, karena mereka memiliki kombinasi ikatan logam terdelokalisasi dan ikatan yang lebih kuat dari elektron d yang terlokalisasi.

Secara keseluruhan, struktur rapat pada logam meningkatkan stabilitas melalui tumpang tindih maksimal orbital dan distribusi energi yang lebih efisien di antara elektron konduksi. Logam transisi memiliki ikatan yang lebih kuat karena mereka dapat memanfaatkan ikatan kovalen parsial dari elektron d , menjadikan mereka unik di antara jenis logam lainnya.

2.2.4 Ikatan Van der Waals

Ikatan van der Waals adalah interaksi yang lemah dan murni mekanis kuantum antara atom dan molekul. Ikatan ini muncul dari fluktuasi kuantum dalam distribusi elektron. Awan elektron di

sekitar inti atom atau molekul tidak sepenuhnya statis melainkan mengalami perubahan kecil dalam distribusi muatan, menghasilkan dipol sementara yang berubah-ubah. Atom-atom atau molekul dengan awan elektron yang berfluktuasi ini dapat dipandang sebagai dipol-dipol yang berubah-ubah seiring waktu.

Dipol sementara ini dapat mempolarisasi atom atau molekul tetangga, menghasilkan dipol yang diinduksi. Interaksi dipol sementara dan dipol yang diinduksi ini menghasilkan gaya tarik menarik, yang mengurangi energi total sistem dan menyebabkan pembentukan ikatan lemah antara atom atau molekul tersebut.

Interaksi van der Waals jauh lebih lemah daripada ikatan ionik, kovalen, atau logam. Energi pengikatan per atom atau molekul dalam ikatan van der Waals biasanya hanya dalam orde beberapa mili-elektronvolt (meV). Karena kelemahannya, ikatan ini hanya berkontribusi signifikan pada struktur padatan yang tidak memiliki jenis ikatan kuat lainnya, seperti pada gas mulia (misalnya, argon atau neon), dimana interaksi van der Waals adalah satu-satunya gaya yang bekerja di antara atom-atom.

Padatan yang disatukan hanya oleh ikatan van der Waals dikenal sebagai kristal van der Waals, dan ikatan ini hanya cukup kuat untuk membentuk padatan pada suhu yang sangat rendah. Pada suhu yang lebih tinggi, energi termal akan mengatasi gaya lemah ini, menyebabkan zat tersebut berada dalam bentuk cair atau gas.

Ikatan van der Waals, meskipun lemah, berperan dalam mengikat struktur tertentu yang tidak menunjukkan ikatan kimia kuat lainnya. Contoh khas adalah kristal gas mulia, di mana suhu rendah diperlukan agar ikatan van der Waals cukup kuat untuk mempertahankan struktur padatan.

2.2.5 Ikatan Hidrogen

Ikatan hidrogen adalah jenis ikatan yang terjadi ketika atom hidrogen membentuk ikatan kovalen dengan atom yang sangat elektronegatif seperti fluor (F) atau oksigen (O).

Atom hidrogen hanya memiliki satu elektron, sehingga hanya dapat membentuk satu ikatan kovalen. Ketika hidrogen berikatan dengan atom yang sangat elektronegatif (misalnya, F atau O),

elektron yang dimiliki bersama dalam ikatan akan cenderung lebih dekat ke atom yang lebih elektronegatif. Akibatnya, elektron tertarik mendekat atom elektronegatif tersebut, menyebabkan atom hidrogen memiliki muatan parsial positif.

Karena hidrogen sangat kecil, muatan positif parsial pada inti hidrogen akan memiliki kepadatan muatan yang relatif tinggi di area yang kecil. Muatan parsial positif ini dapat menarik muatan parsial negatif dari molekul lain yang memiliki atom elektrostatik (seperti O dan N), menciptakan gaya tarik elektrostatik antara molekul yang berbeda.

Ikatan hidrogen biasanya lemah dibandingkan dengan ikatan kovalen atau ionik. Namun, ikatan ini masih cukup signifikan untuk mempengaruhi struktur dan sifat fisik senyawa. Dalam beberapa kasus, seperti pada es atau dalam heliks ganda DNA, ikatan hidrogen berperan penting dan energi kohesif dari ikatan ini bisa mencapai beberapa ratus mili-elektronvolt (meV) per atom atau molekul. Ini cukup kuat untuk mempertahankan struktur dalam fase padat atau dalam susunan biologis seperti DNA.

Pada suhu rendah, molekul-molekul air membentuk struktur kristal yang distabilkan oleh ikatan hidrogen. Ikatan ini menyebabkan molekul air saling tertarik dan membentuk struktur es yang memiliki kepadatan lebih rendah daripada air cair.

Ikatan hidrogen juga berperan dalam menjaga struktur heliks ganda DNA, menghubungkan basa nitrogen satu sama lain dalam susunan pasangan basa. Meskipun ikatan hidrogen individual dalam DNA relatif lemah, jumlah besar ikatan ini di sepanjang molekul DNA memberikan stabilitas yang diperlukan untuk mempertahankan struktur heliks.

Ikatan hidrogen adalah gaya antarmolekul penting yang memberi kontribusi pada stabilitas dan sifat unik dari banyak zat, terutama dalam biologi dan kimia, meskipun lebih lemah dari ikatan kovalen dan ionik.

2.3 Energi Ikatan dan Stabilitas Struktur Kristal

Struktur kristal dalam material zat padat dipengaruhi secara langsung oleh kekuatan ikatan antar atom atau ion yang

menyusunnya. Energi yang terkait dengan ikatan-ikatan ini sangat menentukan kestabilan fisik dan sifat-sifat material.

Stabilitas struktur kristal tidak hanya dipengaruhi oleh energi kohesi, tetapi juga dipengaruhi oleh faktor termodinamika lainnya seperti suhu dan tekanan.

Pada suhu dan tekanan tertentu, struktur kristal yang paling stabil adalah memiliki energi bebas Gibbs minimum. Beberapa material memiliki struktur yang berubah seiring kenaikan suhu atau tekanan, seperti grafit yang berubah menjadi berlian pada tekanan tinggi karena perbedaan dalam energi bebas.

Kristal dapat mengalami transisi fase ketika perubahan suhu atau tekanan cukup signifikan untuk mengatasi energi kohesif yang menahan struktur tersebut. Misalnya, es yang memiliki struktur kristal tertentu pada tekanan atmosfer normal, dapat berubah menjadi fase yang berbeda pada tekanan tinggi.

Stabilitas kristal juga ditentukan oleh bagaimana atom atau ion tersusun. Struktur rapat dengan jumlah tetangga terdekat yang tinggi, seperti FCC atau HCP, memiliki energi ikatan lebih besar per atom dan lebih stabil dibandingkan struktur BCC (*Body-Centered Cubic*) yang memiliki jumlah tetangga terdekat lebih sedikit.

Energi ikatan dalam struktur kristal memberikan dampak besar pada sifat-sifat fisik dan mekanis material, termasuk: kekerasan, material dengan energi kohesi tinggi, seperti berlian, memiliki kekerasan yang tinggi. Struktur ini sulit diganggu karena ikatan kovalen yang kuat antara atom karbonnya. Titik leleh dan stabilitas suhu tinggi, kristal dengan energi kohesi tinggi memiliki titik leleh yang lebih tinggi karena dibutuhkan lebih banyak energi untuk memutus ikatan-ikatan dalam kristal tersebut. Konduktivitas termal dan elektrik, material dengan ikatan logam memiliki konduktivitas listrik yang tinggi karena elektron yang terdelokalisasi. Konduktivitas termal dan elektrik berhubungan langsung dengan jenis dan kekuatan ikatan antar atom.

Berbagai aplikasi material berdasarkan energi ikatan: Karena energi kohesi yang tinggi, berlian digunakan dalam aplikasi industri yang membutuhkan material keras, seperti mata bor. Sebagai kristal ionik, NaCl memiliki energi kisi yang cukup besar dan stabilitas yang baik pada suhu ruang, tetapi mudah larut dalam air karena ion-

ionnya terpisah di dalam pelarut. Dengan ikatan van der Waals yang lemah antar lapisannya, grafit memiliki stabilitas struktural yang rendah dalam arah antar lapisan tetapi tetap konduktif dan digunakan dalam aplikasi seperti elektroda dan pelumas.

Energi ikatan dan stabilitas struktur kristal adalah faktor utama yang menentukan sifat-sifat material. Pemahaman tentang kekuatan ikatan, energi kohesi dan interaksi antar atom dalam struktur kristal memungkinkan untuk memprediksi dan memanfaatkan sifat-sifat material untuk berbagai aplikasi industri dan teknologi.

2.4 Sifat Fisik yang Dipengaruhi oleh Jenis Ikatan

Ikatan antar atom atau ion dalam material memainkan peran penting dalam menentukan sifat-sifat fisik material, seperti kekerasan, titik leleh, konduktivitas listrik dan konduktivitas termal.

2.4.1 Kekerasan

Material dengan ikatan kovalen cenderung sangat keras karena ikatan yang terarah dan kuat antara atom-atom. Contoh paling terkenal adalah berlian, yang terdiri dari atom karbon dengan ikatan kovalen yang kuat dalam struktur tetrahedral, membuatnya menjadi material paling keras yang dikenal

Kristal ionik juga umumnya keras, tetapi biasanya lebih rapuh dibandingkan dengan material kovalen karena mudah mengalami retakan jika mengalami tekanan tertentu. Contohnya adalah NaCl, yang keras namun rapuh.

Logam memiliki sifat keras, tetapi juga lentur, yang membuatnya berbeda dengan kristal ionik atau kovalen. Hal ini disebabkan oleh elektron konduksi yang terdelokalisasi, memungkinkan atom-atom dalam logam untuk bergeser tanpa menyebabkan keretakan. Logam seperti baja menunjukkan kekerasan yang tinggi namun tetap mampu diubah bentuknya.

Material yang terikat oleh ikatan van der Waals biasanya bersifat lunak dan mudah terkelupas. Contohnya adalah grafit, dimana lapisan-lapisan karbon saling berinteraksi dengan gaya van der Waals lemah, sehingga mudah dipisahkan menjadi lapisan-lapisan tipis.

2.4.2 Titik leleh dan titik didih

Kristal ionik, seperti NaCl dan MgO, memiliki titik leleh dan titik didih karena gaya tarik-menarik elektrostatik yang kuat antara ion-ion positif dan negatif. Butuh energi tinggi untuk memisahkan ion-ion ini.

Material dengan ikatan kovalen juga memiliki titik leleh tinggi. Berlian, misalnya, memiliki titik leleh sangat tinggi karena ikatan kovalen yang sangat kuat dalam tiga dimensi. Namun, senyawa seperti silikon karbida dan boron nitrida juga memiliki titik leleh tinggi dan digunakan dalam aplikasi suhu tinggi.

Titik leleh logam bervariasi tergantung pada struktur dan jenis logamnya. Logam transisi seperti besi dan tungsten memiliki titik leleh tinggi karena ikatan logam yang kuat antara elektron terdelokalisasi dan ion logam. Logam alkali, seperti natrium, memiliki titik leleh lebih rendah.

Material dengan ikatan van der Waals, seperti kristal gas mulia (Argon atau Neon), memiliki titik leleh dan titik didih yang sangat rendah karena gaya tarik van der Waals yang lemah. Material seperti grafit dan molekul organik padat juga menunjukkan titik leleh rendah untuk alasan yang sama.

2.4.3 Konduktivitas Listrik

Logam memiliki konduktivitas listrik yang sangat tinggi. Elektron-elektron dalam logam terdelokalisasi dan bebas bergerak, yang memungkinkan aliran arus listrik. Hal ini menyebabkan logam, seperti tembaga dan aluminium, sering digunakan sebagai penghantar listrik.

Kristal ionik, seperti NaCl, tidak menghantarkan listrik dalam keadaan padat karena ion-ionnya terikat dalam kisi kristal. Namun, ketika meleleh atau dilarutkan, ion-ion menjadi bebas bergerak dan mampu menghantarkan listrik, seperti dalam larutan elektrolit.

Sebagian besar material kovalen adalah isolator karena tidak ada elektron bebas. Namun, ada pengecualian seperti grafit, yang memiliki ikatan kovalen dalam lapisan dengan elektron terdelokalisasi antar lapisan, memungkinkan konduktivitas listrik yang tinggi.

Material dengan ikatan van der Waals umumnya isolator atau konduktor yang sangat buruk karena tidak memiliki elektron yang mudah bergerak.

2.4.4 Konduktivitas Termal

Logam juga memiliki konduktivitas termal yang tinggi karena elektron konduksi yang bebas bergerak, memungkinkan panas untuk ditransfer dengan cepat melalui logam. Material seperti tembaga, aluminium, dan perak sering digunakan dalam aplikasi termal karena kemampuan konduksi panas yang sangat baik.

Material dengan kovalen kuat, seperti berlian, memiliki konduktivitas termal yang tinggi karena ikatan yang kuat dan arah getaran fonon yang mudah teratur. Berlian memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi daripada sebagian besar logam.

Kristal ionik memiliki konduktivitas termal sedang. Dalam material seperti NaCl, panas ditransfer melalui getaran kisi (fonon) dan bukan oleh elektron bebas. Namun, kristal ionik biasanya tidak seefektif logam atau berlian dalam menghantarkan panas.

Material dengan ikatan van der Waals, seperti gas mulai padat atau kristal molekul organik, memiliki konduktivitas termal yang rendah karena interaksi yang lemah antara atom atau molekul dan tidak adanya elektro bebas.

2.4.5 Sifat Optik

Banyak kristal ionik, seperti NaCl dan CaF_2 , bersifat transparan terhadap cahaya karena tidak memiliki elektron bebas untuk menyerap foton pada panjang gelombang cahaya tampak.

Material kovalen juga dapat bersifat transparan, terutama jika tidak ada elektron yang dapat melompat ke pita konduksi dengan mudah. Contohnya adalah berlian, yang transparan dan memantulkan cahaya, memberikan kilau tinggi.

Logam biasanya buram dan reflektif karena adanya elektron bebas yang dapat menyerap dan memantulkan cahaya. Sifat ini menyebabkan logam memiliki kilai dan digunakan dalam aplikasi reflektif.

Material dengan ikatan van der Waals, seperti kristal molekul organik, sering kali transparan dan memiliki sifat optik bervariasi tergantung pada molekul penyusunnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Kittel, C. 2004. *Introduction to Solid State Physics* (8th edition). Hoboken, NJ:Wiley
- Tong, David. 2017. *Solid State Physics*. Cambridge: Preprint typeset in JHEP Style
- Galperin, Yuri M. 2014. *Introduction to Modern Solid State Physics*. Norwegia: CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Hofmann, Philip. 2015. *Solid State Physics, An Introduction*. Second Edition. Germany: Wiley-VCH.

BAB 3

DIFRAKSI SINAR X

Oleh Muh. Said L

3.1 Pengantar

Difraksi sinar X adalah teknik yang sangat penting dalam analisis struktur material, terutama dalam bidang kristalografi. Teknik ini pertama kali ditemukan oleh Wilhelm Röntgen pada tahun 1895, tetapi penerapannya untuk mengamati struktur kristal baru dikembangkan pada awal abad ke-20. Difraksi sinar X memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi susunan atom dalam kristal melalui analisis pola difraksi yang dihasilkan. Ketika sinar X mengenai suatu kristal, sinar tersebut akan dihamburkan oleh elektron dalam atom yang membentuk kristal tersebut. Pola difraksi yang dihasilkan dapat diukur dan diinterpretasikan untuk menentukan struktur material pada tingkat atomik. Dalam difraksi sinar X adalah Hukum Bragg, yang dirumuskan oleh William Henry Bragg dan William Lawrence Bragg pada tahun 1913. Hukum ini menyatakan bahwa untuk terjadi difraksi, sudut datang sinar X harus memenuhi persamaan tertentu yang dikenal sebagai persamaan Bragg. Persamaan ini menghubungkan panjang gelombang sinar X, jarak antar bidang dalam kristal, dan sudut datang sinar X. Ketika syarat-syarat Hukum Bragg terpenuhi, sinar X yang terpantul dari berbagai bidang dalam kristal akan memperkuat satu sama lain, menciptakan pola difraksi yang bisa diamati. Inilah yang menjadi dasar bagi analisis struktur kristal menggunakan teknik difraksi sinar X (C. Hammond, 2015 & Coppens, P., 2020).

Teknik sinar X sangat penting dalam penelitian kristalografi, khususnya dalam identifikasi dan karakterisasi struktur material padat. Berbagai teknik seperti metode powder diffraction dan single crystal diffraction digunakan untuk menganalisis material dengan sifat dan ukuran yang berbeda. Dalam powder diffraction, sampel yang diteliti dalam bentuk serbuk atau padatan halus, memungkinkan analisis material dalam bentuk yang kurang teratur.

Metode ini digunakan dalam ilmu material, farmasi, dan geologi untuk analisis senyawa kristalin yang kompleks. Sementara itu, metode single crystal diffraction lebih cocok untuk menganalisis struktur kristal tunggal dengan akurasi tinggi, yang sangat penting dalam studi molekul biologis dan senyawa organik.

Instrumen yang dalam eksperimen difraksi sinar X sangatlah beragam, meliputi sumber sinar X, detektor, dan alat untuk memposisikan sampel. Sumber sinar X biasanya berasal dari tabung sinar X atau sinkrotron yang dapat menghasilkan sinar X dengan intensitas dan panjang gelombang yang dikontrol. Detektor modern, seperti detektor berbasis CCD, sangat efisien dalam menangkap data pola difraksi dengan resolusi tinggi. Selain itu, terdapat perangkat khusus yang memungkinkan pemutaran sampel untuk memperoleh pola difraksi dari berbagai sudut. Dengan bantuan perangkat lunak analisis, pola difraksi yang diperoleh bisa dikalkulasi secara komputasi untuk menghasilkan model tiga dimensi dari susunan atom dalam kristal.

Dalam dunia sains, aplikasi sinar X meluas ke berbagai bidang, mulai dari ilmu material hingga biologi molekuler. Dalam ilmu material, teknik ini digunakan untuk mengidentifikasi struktur logam, keramik, dan polimer. Di bidang farmasi, difraksi sinar X memungkinkan penentuan struktur molekul obat untuk memastikan efikasi dan stabilitasnya. Sementara dalam biologi molekuler, difraksi sinar X digunakan dalam mempelajari struktur protein dan asam nukleat yang menjadi dasar pemahaman fungsi biologis. Difraksi sinar X terus berkembang, dengan teknologi baru yang memungkinkan pengamatan struktur material pada resolusi yang lebih tinggi dan dengan kecepatan yang lebih cepat (B. E. Warren, 2016).

3.2 Sejarah dan Perkembangan Difraksi Sinar X

Difraksi sinar X pertama kali ditemukan pada akhir abad ke-19, ketika Wilhelm Conrad Röntgen secara tidak sengaja menemukan sinar X pada tahun 1895. Röntgen menemukan bahwa sinar ini mampu menembus bahan padat dan menghasilkan gambar pada pelat fotografi, yang kemudian diberi nama "sinar X" karena sifatnya yang belum diketahui. Penemuan ini menarik perhatian

luas di kalangan ilmuwan dan membuka jalan bagi aplikasi sinar X di berbagai bidang. Sinar X segera digunakan dalam kedokteran untuk pencitraan tubuh manusia, terutama dalam mendeteksi patah tulang dan anomali lainnya. Penemuan ini juga mendapat pengakuan besar, dengan Röntgen menerima Hadiah Nobel Fisika pertama pada tahun 1901 (West, A. R., 2014).

Pada awal abad ke-20, minat terhadap sinar X semakin meningkat di kalangan ilmuwan, termasuk dalam penelitian tentang struktur atom. Pada tahun 1912, Max von Laue dan timnya di Universitas Munich menemukan bahwa sinar X dapat dibiaskan oleh kristal, membuktikan bahwa sinar X adalah gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang tertentu. Von Laue menyadari bahwa difraksi yang dihasilkan mengikuti pola yang bisa diukur dan dianalisis. Eksperimen ini mengonfirmasi teori gelombang elektromagnetik yang diajukan oleh James Clerk Maxwell dan membantu ilmuwan memahami sifat dasar sinar X. Atas jasanya, von Laue dianugerahi Hadiah Nobel Fisika pada tahun 1914 (Hammond, C., 2015).

Penemuan Max von Laue mendorong William Henry Bragg dan putranya, William Lawrence Bragg, untuk lebih mendalami interaksi antara sinar X dan kristal. Pada tahun 1913, mereka merumuskan Hukum Bragg, yang menjelaskan kondisi yang harus dipenuhi agar sinar X menghasilkan pola difraksi saat mengenai kristal. Hukum Bragg menyatakan bahwa sinar X akan mengalami interferensi konstruktif jika panjang lintasan tambahan memenuhi hubungan matematis tertentu dengan sudut datangnya. Ini memungkinkan peneliti untuk menghitung jarak antar bidang atom dalam kristal, menjadikan difraksi sinar X sebagai alat yang kuat untuk analisis kristalografi. Bragg dan ayahnya menerima Hadiah Nobel Fisika pada tahun 1915 atas kontribusi mereka dalam pengembangan difraksi sinar X (Glusker, J. P., et al., 1994).

Setelah Hukum Bragg ditemukan, difraksi sinar X mulai digunakan untuk menentukan struktur material secara akurat. Pada tahun 1920-an, metode ini diterapkan untuk mengidentifikasi struktur berbagai kristal sederhana seperti garam dan logam. Perkembangan teknologi dalam bidang ini sangat pesat, memungkinkan para ilmuwan untuk memperdalam pemahaman

tentang struktur kristal dan ikatan kimia dalam berbagai senyawa. Penelitian ini juga membuka jalan bagi perkembangan ilmu material, karena pengetahuan tentang struktur atom memberikan wawasan penting dalam merancang material dengan sifat tertentu. Difraksi sinar X menjadi teknik yang sangat penting di laboratorium penelitian fisika dan kimia (Warren, B. E., 2016).

Pada dekade 1950-an, difraksi sinar X mengalami lompatan besar dengan ditemukannya struktur DNA oleh James Watson dan Francis Crick. Gambar difraksi sinar X yang dihasilkan oleh Rosalind Franklin dan Maurice Wilkins menjadi kunci dalam menentukan bahwa DNA memiliki struktur heliks ganda. Penemuan ini menandai awal dari era biologi molekuler dan membuka pintu bagi penelitian lebih lanjut tentang genetika. Difraksi sinar X sejak saat itu menjadi metode utama dalam mengidentifikasi struktur molekul biologis, termasuk protein dan enzim. Aplikasi ini terus berkembang dan memainkan peran penting dalam ilmu kesehatan dan farmasi (Watson, J. D., & Crick, F. H. C., 1953).

Pada tahun 1960-an hingga 1970-an, difraksi sinar X semakin diperkaya dengan hadirnya komputer untuk menganalisis pola difraksi secara lebih cepat dan akurat. Komputer memungkinkan analisis data dalam jumlah besar dan pemodelan tiga dimensi dari struktur kristal yang kompleks. Ini juga memfasilitasi pengembangan perangkat lunak khusus untuk analisis kristalografi, yang kini menjadi standar dalam penelitian. Kemajuan teknologi ini memungkinkan difraksi sinar X diterapkan pada bahan yang lebih kompleks, termasuk polimer dan mineral. Dengan adanya komputer, difraksi sinar X menjadi lebih mudah diakses oleh para ilmuwan di seluruh dunia (Coppens, P., 2020).

Pada tahun 1980-an, teknologi sinkrotron mulai digunakan sebagai sumber sinar X yang jauh lebih kuat dibandingkan dengan tabung sinar X konvensional. Sinkrotron menghasilkan sinar X dengan intensitas dan panjang gelombang yang bisa dikontrol dengan presisi tinggi, memungkinkan penelitian struktur pada resolusi yang lebih baik. Sumber sinar X sinkrotron memungkinkan analisis material yang lebih kecil dan lebih kompleks, seperti mikrostruktur pada material komposit. Selain itu, sinkrotron memungkinkan eksperimen difraksi sinar X dilakukan dengan lebih

cepat dan hasil yang lebih akurat. Perkembangan ini mendorong penelitian material maju dan nanoteknologi (Als-Nielsen, J., & McMorrow, D., 2011).

Difraksi sinar X juga semakin berkembang dalam bidang ilmu material dan nanoteknologi pada tahun 2000-an, dengan munculnya metode baru seperti *Small-Angle X-ray Scattering* (SAXS) dan *Wide-Angle X-ray Scattering* (WAXS). Metode SAXS memungkinkan analisis struktur material pada skala nanometer, yang sangat berguna dalam penelitian polimer dan material biologis. Sedangkan WAXS digunakan untuk mempelajari struktur material pada skala atomik dan molekul. Kedua metode ini memperluas aplikasi difraksi sinar X ke bidang penelitian baru, termasuk ilmu material lunak dan kimia supramolekular. Dengan demikian, difraksi sinar X terus memberikan kontribusi penting dalam ilmu pengetahuan modern (Guinier, A., 1994).

Saat ini, difraksi sinar X telah menjadi alat utama dalam banyak penelitian ilmu material, kimia, dan biologi. Kemajuan teknologi detektor sinar X, seperti detektor berbasis CCD dan CMOS, semakin meningkatkan resolusi dan sensitivitas dalam pengukuran pola difraksi. Perangkat lunak analisis yang semakin canggih juga memungkinkan interpretasi data yang lebih kompleks dengan lebih akurat. Teknologi ini kini memungkinkan pengukuran difraksi sinar X dilakukan secara in-situ, artinya struktur material dapat dianalisis dalam kondisi nyata seperti pada suhu tinggi atau tekanan tinggi. Difraksi sinar X pun terus berkembang dan digunakan dalam riset-riset terbaru (Shmueli, U., 2007).

Secara keseluruhan, difraksi sinar X telah mengalami perkembangan signifikan sejak awal ditemukan hingga sekarang. Dari pengamatan struktur kristal sederhana, kini teknik ini mampu menganalisis molekul kompleks seperti protein dan struktur nanomaterial. Perkembangan teknologi detektor, sumber sinar X, dan perangkat lunak analisis telah memungkinkan difraksi sinar X menjadi metode yang sangat esensial dalam ilmu pengetahuan. Aplikasi teknik ini juga telah meluas ke berbagai disiplin ilmu, termasuk ilmu material, farmasi, kimia, dan biologi molekuler. Difraksi sinar X membuktikan bahwa metode ilmiah dapat terus

berkembang dengan kemajuan teknologi dan kebutuhan penelitian yang semakin kompleks (Palstra, M. N. J., 2018).

3.3 Prinsip Kerja Difraksi Sinar X

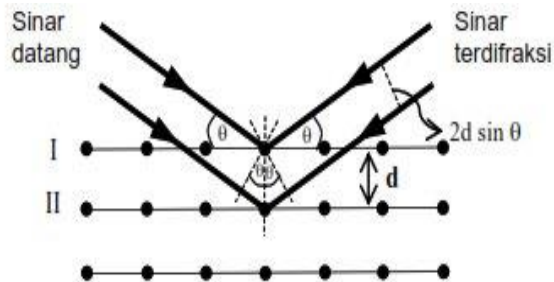
Prinsip kerja difraksi sinar X didasarkan pada **Hukum Bragg**, yang menjelaskan bagaimana sinar X berinteraksi dengan bidang atom dalam kristal. Ketika sinar X diarahkan ke kristal, sinar ini akan mengalami hamburan oleh elektron-elektron di dalam atom. Jika kristal memiliki susunan atom yang teratur, hamburan sinar X dari berbagai bidang atom akan saling berinterferensi. Interferensi ini bisa bersifat konstruktif atau destruktif, tergantung pada sudut datang sinar X dan jarak antar bidang atom dalam kristal (B. E. Warren, 2016).

Untuk mendapatkan interferensi konstruktif yang menghasilkan pola difraksi, sudut datang sinar X harus memenuhi persamaan Hukum Bragg, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.1)$$

Di sini, n adalah bilangan bulat yang menunjukkan urutan difraksi (order difraksi), λ adalah panjang gelombang sinar X, d adalah jarak antar bidang atom dalam kristal, dan θ adalah sudut datang sinar X terhadap bidang atom. Ketika kondisi ini terpenuhi, sinar X yang dihamburkan dari berbagai bidang kristal akan saling menguatkan, membentuk pola difraksi yang bisa direkam oleh detektor.

Dengan memvariasikan sudut θ dan mengukur intensitas sinar yang terdeteksi, peneliti dapat menghasilkan data difraksi yang menggambarkan susunan atom dalam kristal. Pola ini kemudian dianalisis untuk menentukan parameter struktural kristal seperti jarak antar atom dan orientasi bidang atomik.



Gambar 3.1. Skema Hukum Bragg pada Difraksi Sinar X
(C. Hammond, 2015)

Gambar di atas menggambarkan prinsip kerja difraksi sinar X berdasarkan Hukum Bragg. Gambar tersebut menunjukkan sinar X yang datang pada suatu kristal dan berinteraksi dengan dua bidang atom berturut-turut yang diberi label I dan II. Ketika sinar X mengenai bidang atom pada sudut tertentu (θ), sebagian sinar akan dihamburkan, dan interferensi konstruktif terjadi ketika lintasan tambahan antara sinar yang dihamburkan oleh bidang I dan II adalah kelipatan dari panjang gelombang sinar X (λ). Perbedaan lintasan antar sinar yang terpantul adalah $2d\sin\theta$. Ketika syarat ini terpenuhi, sinar yang dipantulkan dari bidang I dan II akan berinterferensi secara konstruktif, menghasilkan pola difraksi yang bisa diukur oleh detektor. Pola ini kemudian digunakan untuk menentukan parameter struktur kristal seperti jarak antar atom dan orientasi bidang kristal.

3.4 Hukum Bragg dan Difraksi Sinar X

Hukum Bragg merupakan dasar teori difraksi sinar X, yang dikembangkan pada tahun 1913. Hukum ini menghubungkan panjang gelombang sinar X dengan jarak antar bidang atom dalam kristal, serta sudut datang sinar tersebut. Hukum Bragg menjelaskan kondisi yang harus dipenuhi agar sinar X mengalami interferensi konstruktif ketika berinteraksi dengan kristal. Interferensi konstruktif ini terjadi ketika sinar X yang dipantulkan dari lapisan-lapisan atom dalam kristal berada dalam fase yang sama. Hukum Bragg dinyatakan dalam bentuk persamaan: $n\lambda = 2d\sin\theta$, di mana n adalah bilangan bulat, λ adalah panjang gelombang sinar X, d adalah

jarak antar bidang atom, dan θ adalah sudut datang sinar X (West, 2014).

Dalam difraksi sinar X, sinar datang diarahkan pada kristal dan mengenai bidang atom pada sudut tertentu. Jika sudut ini memenuhi persamaan Bragg, sinar yang dipantulkan dari berbagai bidang kristal akan saling menguatkan, menghasilkan pola difraksi yang dapat dideteksi. Dengan menganalisis pola difraksi ini, peneliti dapat menentukan struktur internal dari kristal tersebut. Hukum Bragg menjadi alat penting dalam kristalografi, karena memungkinkan penentuan struktur tiga dimensi dari material kristal. Struktur atom dalam kristal dapat diketahui dengan mengukur sudut dan intensitas sinar difraksi yang terpantul (Duxbury, 2015).

Difraksi sinar X sendiri adalah proses di mana sinar X tersebar oleh atom-atom dalam kristal, yang menghasilkan pola interferensi. Ketika sinar X mengenai kristal, sinar tersebut dihamburkan oleh elektron-elektron di sekitar atom dalam struktur kristal. Hamburan ini kemudian menghasilkan pola interferensi yang khas, yang bergantung pada susunan atom dalam kristal. Jika susunan atom tersebut teratur, pola difraksi akan simetris dan dapat diinterpretasi untuk mengetahui jarak antar atom. Difraksi sinar X sangat berguna dalam analisis struktur material, terutama material yang memiliki sifat kristalinitas (Glusker & Trueblood, 1994).

Keunikan dari hukum ini adalah kemampuannya dalam menjelaskan difraksi sinar X pada struktur kristal yang kompleks. Sebelum penemuan hukum ini, sulit bagi para ilmuwan untuk memahami bagaimana sinar X berinteraksi dengan struktur material yang teratur. Hukum Bragg memungkinkan para ilmuwan memodelkan struktur kristal secara kuantitatif, yang sangat penting dalam kimia dan fisika material. Dengan adanya hukum ini, kristalografi sinar X menjadi metode standar dalam penelitian struktur kristal. Hukum Bragg juga memungkinkan identifikasi jenis kristal tertentu hanya berdasarkan pola difraksi yang dihasilkan (Cullity, 2016).

Selain untuk menentukan struktur kristal, Hukum Bragg dan difraksi sinar X juga digunakan untuk mempelajari berbagai sifat material. Dalam ilmu material, teknik ini membantu memahami

perubahan struktur kristal akibat perubahan suhu, tekanan, atau komposisi. Difraksi sinar X memungkinkan peneliti untuk melihat perubahan fase, mendeteksi cacat pada kristal, serta mempelajari sifat mekanik dari material kristal. Hukum Bragg membantu menjelaskan bagaimana kekuatan ikatan atomik dan struktur kristal mempengaruhi sifat mekanis material. Dengan demikian, hukum ini berperan penting dalam desain material dengan sifat spesifik (Smart & Moore, 2011).

Difraksi sinar X juga sangat penting dalam bidang biologi molekuler, khususnya dalam penentuan struktur molekul biologis. Struktur DNA, protein, dan molekul lainnya telah berhasil diidentifikasi dengan menggunakan teknik difraksi sinar X. Hukum Bragg memungkinkan para ilmuwan untuk menentukan bagaimana atom tersusun dalam molekul biologis yang besar. Dengan mengetahui struktur molekul ini, peneliti dapat memahami fungsi biologis dari molekul tersebut. Hal ini juga berpengaruh besar dalam penemuan obat, karena mengetahui struktur protein target dapat membantu dalam desain obat yang efektif (Watson & Crick, 1953).

Pada tingkat lanjut, Hukum Bragg juga memungkinkan analisis struktur material pada skala nanometer. Difraksi sinar X dengan teknik Small-Angle X-ray Scattering (SAXS) memungkinkan analisis material yang memiliki struktur nano. Teknik ini berguna dalam analisis material polimer, koloid, dan material biologis dengan struktur kompleks. Dengan menggunakan SAXS, peneliti dapat mempelajari bentuk dan ukuran partikel pada skala nano, serta bagaimana partikel tersebut tersusun. Difraksi sinar X pada skala kecil ini menjadi salah satu alat utama dalam pengembangan nanoteknologi (Guinier, 1994).

Hukum Bragg juga diaplikasikan dalam penelitian material yang amorf atau tidak memiliki struktur kristal yang teratur. Meski pada dasarnya hukum ini lebih cocok untuk kristal, teknik difraksi sinar X dapat dimodifikasi untuk mempelajari material amorf seperti kaca. Pola hamburan dari material amorf cenderung berbeda dengan material kristal, tetapi masih dapat memberikan informasi tentang struktur lokal. Analisis material amorf menggunakan sinar X membantu memahami ikatan antar atom pada material non-

kristalin. Hal ini sangat berguna dalam industri kaca dan polimer (International Union of Crystallography, 2007).

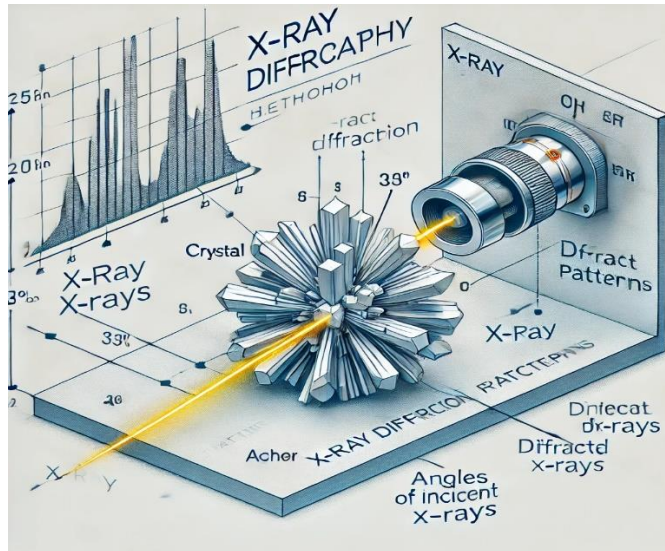
Difraksi sinar X telah mengalami perkembangan signifikan dengan hadirnya sumber sinar X intensitas tinggi, seperti sinar X sinkrotron. Sumber sinkrotron memungkinkan difraksi sinar X dengan resolusi tinggi dan waktu pengambilan data yang lebih cepat. Penggunaan sinkrotron juga memungkinkan pengukuran in-situ, di mana struktur kristal dapat diamati dalam kondisi suhu atau tekanan tinggi. Teknologi ini sangat berguna dalam penelitian material, khususnya untuk memahami perubahan struktur saat material digunakan dalam kondisi ekstrem. Dengan demikian, hukum Bragg dan difraksi sinar X tetap relevan dalam penelitian modern (Eisebitt, 2018).

Secara keseluruhan, Hukum Bragg dan difraksi sinar X telah menjadi fondasi penting dalam ilmu kristalografi dan ilmu material. Penemuan ini membuka jalan bagi pemahaman yang lebih dalam mengenai struktur atomik material dan interaksinya. Hingga saat ini, difraksi sinar X tetap menjadi metode utama dalam analisis struktur material di berbagai disiplin ilmu. Hukum Bragg memungkinkan peneliti untuk mempelajari struktur atomik material dengan akurasi tinggi. Oleh karena itu, kontribusi hukum ini terhadap sains modern tidak dapat diragukan lagi (Krause & French, 2013).

3.5 Metode Difraksi Sinar X dalam Kristalografi

Metode difraksi sinar X dalam kristalografi merupakan teknik utama untuk menentukan struktur atom dan molekul dalam material kristal. Proses ini melibatkan interaksi antara sinar X dengan kristal yang menyebabkan sinar tersebut terhambur pada sudut tertentu. Difraksi terjadi karena panjang gelombang sinar X serupa dengan jarak antar atom dalam kristal, sehingga memungkinkan interferensi yang menghasilkan pola difraksi. Pola difraksi ini berupa serangkaian titik yang merefleksikan susunan atom dalam kristal. Metode ini menjadi alat penting dalam penelitian material dan kimia fisik (Cullity, 2016). Berikut adalah gambar ilustrasi dari metode difraksi sinar X dalam kristalografi, yang menunjukkan interaksi sinar X dengan sampel kristal,

menghasilkan pola difraksi. Gambar ini mencakup bagian-bagian yang diberi label seperti sumber sinar X, kristal, pola difraksi pada detektor, dan sudut datang sinar X.



Gambar 3.2. Metode Difraksi Sinar X dalam Kristalografi (Cullity, B.D., 2016)

Difraksi sinar X beroperasi berdasarkan Hukum Bragg, yang menyatakan bahwa interferensi konstruktif terjadi ketika sinar X memenuhi persamaan tertentu. Persamaan tersebut menghubungkan panjang gelombang sinar X, sudut datang sinar, dan jarak antar bidang kristal. Hukum Bragg ini memungkinkan para ilmuwan untuk menghitung jarak antar atom dalam kristal dengan sangat presisi. Saat sinar X datang pada sudut tertentu, hamburan dari lapisan-lapisan atom di dalam kristal akan berinterferensi secara konstruktif dan menghasilkan pola difraksi. Melalui analisis terhadap pola ini, informasi detail tentang posisi atom dalam struktur kristal dapat diperoleh (Duxbury, 2015).

Dalam kristalografi, terdapat berbagai metode difraksi sinar X seperti metode Laue, metode Debye-Scherrer, dan metode Rotasi. Metode Laue digunakan untuk mempelajari kristal tunggal yang diam dalam berkas sinar X, sedangkan metode Debye-Scherrer

cocok untuk sampel polikristalin. Metode Rotasi, atau metode Weissenberg, melibatkan pemutaran kristal selama iradiasi dengan sinar X untuk mendapatkan informasi struktur tiga dimensi. Setiap metode ini memiliki keunggulan dan keterbatasan tergantung pada jenis kristal dan informasi yang dibutuhkan. Pemilihan metode yang tepat menjadi krusial untuk memperoleh hasil yang akurat (Guinier, 1994). Berikut penjelasan metodenya adalah:

1. Metode Laue merupakan salah satu teknik tertua dalam difraksi sinar X, di mana kristal ditempatkan dalam berkas sinar X putih (sinar X dengan panjang gelombang berbeda). Pola difraksi yang dihasilkan menggambarkan simetri dari struktur kristal tersebut. Teknik ini sangat berguna untuk mempelajari orientasi kristal, terutama dalam penelitian material logam dan mineral. Pola Laue menghasilkan titik-titik yang menggambarkan posisi bidang kristal dalam ruang tiga dimensi. Namun, metode ini kurang cocok untuk penentuan struktur atom yang kompleks (Smart & Moore, 2011).
2. Metode Debye-Scherrer, atau metode bubuk, adalah teknik difraksi sinar X yang digunakan pada sampel polikristalin atau bubuk. Dalam metode ini, sinar X mengenai sampel yang tersusun dari banyak kristal kecil dengan orientasi acak. Pola difraksi yang dihasilkan berbentuk cincin-cincin konsentris yang merefleksikan jarak antar bidang atom. Teknik ini sering digunakan untuk identifikasi fase dalam sampel, karena setiap material memiliki pola difraksi yang khas. Metode Debye-Scherrer sangat berguna dalam analisis bahan campuran dan material amorf (West, 2014).
3. Metode Rotasi atau Weissenberg digunakan pada kristal tunggal dan melibatkan pemutaran kristal pada sumbu tertentu selama proses difraksi. Dengan mengubah sudut orientasi kristal, berbagai bidang kristal akan terekspos pada sinar X dan memberikan pola difraksi yang lebih lengkap. Teknik ini memungkinkan analisis struktur kristal secara lebih mendalam dan menghasilkan gambar tiga dimensi dari susunan atom. Metode ini sangat penting dalam kristalografi protein dan molekul kompleks lainnya. Hasil dari metode ini

memberikan gambaran rinci mengenai posisi atom dan ikatan dalam molekul (Glusker & Trueblood, 1994).

Dalam analisis difraksi sinar X, data yang diperoleh dari pola difraksi kemudian dianalisis menggunakan metode Fourier untuk menghasilkan peta densitas elektron. Peta densitas elektron ini menunjukkan distribusi elektron di sekitar atom dalam kristal. Dengan interpretasi lebih lanjut, peta ini memungkinkan penentuan posisi atom dalam unit sel kristal. Teknik ini memerlukan perangkat lunak kristalografi untuk membantu pemrosesan data yang kompleks. Analisis Fourier menjadi bagian penting dari kristalografi modern karena mampu memberikan informasi tiga dimensi yang detail (Watson & Crick, 1953).

Difraksi sinar X juga memanfaatkan teknik penyelesaian struktur melalui metode direct atau metode MAD (Multi-wavelength Anomalous Dispersion). Metode ini memungkinkan penentuan struktur atomik kristal dengan menggunakan panjang gelombang sinar X yang berbeda. Teknik MAD sering diterapkan dalam studi kristalografi protein, di mana elemen-elemen berat dimasukkan ke dalam kristal untuk meningkatkan kontras difraksi. Teknik ini memungkinkan identifikasi posisi atom spesifik dalam molekul besar yang kompleks. Penyelesaian struktur menggunakan metode MAD telah membantu pemahaman lebih mendalam tentang struktur biomolekul (Eisebitt, 2018).

Metode difraksi sinar X terus berkembang dengan adanya sinkrotron yang menyediakan sinar X dengan intensitas tinggi. Sumber sinkrotron memungkinkan analisis struktur kristal secara lebih cepat dan akurat, serta memungkinkan pengambilan data pada resolusi tinggi. Dengan sinar X sinkrotron, difraksi dapat dilakukan pada sampel dalam kondisi ekstrem, seperti suhu atau tekanan tinggi. Ini membuka peluang baru dalam penelitian material dan pengembangan aplikasi material fungsional. Teknologi sinkrotron juga memungkinkan pemetaan struktur lokal dalam material heterogen (International Union of Crystallography, 2007).

Secara keseluruhan, metode difraksi sinar X dalam kristalografi memberikan fondasi penting dalam penelitian material, kimia, biologi, dan fisika. Teknik ini tidak hanya membantu dalam

pemahaman struktur atom material, tetapi juga memberikan wawasan tentang sifat mekanik, optik, dan elektronik dari material tersebut. Penggunaan difraksi sinar X telah meluas dalam berbagai bidang, termasuk ilmu material, farmasi, dan bioteknologi. Hasil yang diperoleh dari metode ini sangat penting dalam pengembangan teknologi baru dan bahan fungsional. Dengan demikian, difraksi sinar X tetap menjadi alat utama dalam penelitian ilmiah (Krause & French, 2013).

3.6 Analisis Pola Difraksi Sinar X

Difraksi adalah fenomena yang terjadi ketika gelombang, baik gelombang cahaya maupun gelombang lainnya, melewati suatu celah atau berinteraksi dengan penghalang dan mengalami pembelokan. Pola difraksi yang dihasilkan bergantung pada bentuk dan ukuran celah serta panjang gelombang. Analisis pola difraksi dapat memberikan informasi penting tentang sifat gelombang yang terlibat serta objek yang menghalangi gelombang tersebut. Melalui analisis ini, kita dapat mengamati bagaimana gelombang berperilaku dan bagaimana interaksinya dengan lingkungan mempengaruhi pola yang terbentuk. Dalam fisika, pemahaman tentang difraksi sangat penting untuk aplikasi dalam bidang optik, akustik, dan teknologi material (Fowler, 2020).

Salah satu metode analisis pola difraksi adalah menggunakan hukum Huygens, yang menyatakan bahwa setiap titik pada gelombang yang datang dapat dianggap sebagai sumber gelombang sekunder. Ketika gelombang melewati celah, setiap titik pada celah berkontribusi pada pola difraksi yang dihasilkan. Analisis ini membantu menjelaskan distribusi intensitas cahaya yang diamati pada layar di belakang celah. Dalam eksperimen difraksi, pola yang dihasilkan sering kali terdiri dari serangkaian puncak terang dan gelap, yang dikenal sebagai fringing. Hasil ini dapat dianalisis lebih lanjut menggunakan persamaan matematika untuk meramalkan posisi dan intensitas puncak-puncak ini (Young & Rizzo, 2019).

Selain itu, analisis pola difraksi juga dapat dilakukan menggunakan teknik pemrosesan citra untuk menangkap dan menganalisis pola yang dihasilkan. Dengan kemajuan teknologi digital, pola difraksi dapat diambil menggunakan kamera dan

perangkat lunak analisis citra untuk mengukur intensitas dan distribusi cahaya. Metode ini memberikan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan pengukuran manual. Dengan menggunakan teknik ini, para peneliti dapat menyelidiki efek variasi dalam geometri celah, panjang gelombang, dan media yang digunakan. Penelitian ini sangat relevan dalam bidang ilmu material dan nanoteknologi, di mana sifat difraksi dapat mempengaruhi karakteristik material (Li et al., 2021).

Analisis pola difraksi juga dapat diterapkan dalam studi biologi dan medis. Misalnya, pola difraksi cahaya dari sel atau jaringan dapat memberikan informasi tentang struktur dan komposisi biologis. Teknik ini telah digunakan dalam mikroskopi difraksi untuk memvisualisasikan objek kecil dengan resolusi tinggi. Dalam aplikasi medis, analisis pola difraksi dapat membantu dalam diagnosis penyakit dengan mengamati perubahan dalam pola cahaya yang dipantulkan oleh jaringan. Ini menunjukkan bahwa analisis difraksi memiliki aplikasi yang luas dalam ilmu pengetahuan dan teknologi, dari fisika dasar hingga aplikasi klinis (Cohen & Heller, 2022).

Terakhir, pentingnya analisis pola difraksi tidak hanya terbatas pada aplikasi praktis, tetapi juga dalam penelitian dasar untuk memahami sifat gelombang dan interaksinya dengan materi. Pemahaman tentang difraksi memberikan wawasan mendalam tentang prinsip-prinsip gelombang yang mendasari fenomena fisik lainnya. Melalui penelitian dan eksperimen lebih lanjut, para ilmuwan dapat mengembangkan teori dan model baru untuk menjelaskan pola difraksi yang lebih kompleks. Ini membuka jalan bagi pengembangan teknologi baru dan pemahaman yang lebih baik tentang alam. Dengan demikian, analisis pola difraksi tetap menjadi bidang yang aktif dan penting dalam penelitian ilmiah (Smith & Johnson, 2023).

Berikut adalah contoh analisis pola difraksi yang lebih spesifik, termasuk penjelasan langkah demi langkah tentang bagaimana analisis ini dilakukan menggunakan eksperimen klasik dengan celah ganda.

Deskripsi Eksperimen: Eksperimen celah ganda, yang awalnya dilakukan oleh Thomas Young pada tahun 1801, adalah salah satu

contoh paling klasik untuk mengamati pola difraksi dan interferensi cahaya. Dalam eksperimen ini, cahaya koheren (seperti dari laser) diarahkan ke dua celah sempit yang sangat dekat satu sama lain. Ketika cahaya melewati celah-celah tersebut, gelombang cahaya yang keluar dari masing-masing celah berinteraksi, menghasilkan pola terang dan gelap pada layar yang berada di belakang celah.

Analisis Pola Difraksi:

1. Pengukuran Jarak dan Dimensi

Pertama-tama, pengukuran yang akurat diperlukan untuk jarak antara celah (d) dan jarak antara celah dan layar (L). Misalnya, jika jarak antar celah adalah 0,5 mm dan jarak ke layar adalah 1,0 m, data ini sangat penting untuk perhitungan selanjutnya.

2. Pengamatan Pola pada Layar

Saat cahaya mengenai layar, pola difraksi yang terbentuk akan terlihat sebagai serangkaian garis terang (puncak) dan gelap (noda). Puncak terang terjadi di mana gelombang dari kedua celah saling memperkuat (interferensi konstruktif), sedangkan noda gelap terjadi di mana gelombang saling membatalkan (interferensi destruktif).

3. Perhitungan Sudut Puncak

Sudut (θ) untuk puncak terang dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$d \sin(\theta) = m\lambda \quad (3.2)$$

di mana m adalah urutan puncak ($0, \pm 1, \pm 2, \dots$) dan λ adalah panjang gelombang cahaya yang digunakan. Dengan menggunakan panjang gelombang laser (misalnya, 500 nm), kita dapat menghitung sudut untuk puncak pertama ($m=1$).

4. Pola Intensity: Analisis pola intensitas juga bisa dilakukan dengan menggambar grafik intensitas cahaya sebagai fungsi dari posisi pada layar. Intensitas I pada layar dapat dihitung menggunakan rumus:

$$I = I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi dy}{\lambda L} \right) \quad (3.3)$$

di mana I_0 adalah intensitas maksimum, y adalah jarak dari pusat pola ke titik yang diukur pada layar, dan rumus ini

menunjukkan bagaimana intensitas cahaya bervariasi di sepanjang layar.

5. **Interpretasi Hasil:** Dengan menggunakan data yang diperoleh, peneliti dapat menarik kesimpulan tentang sifat gelombang cahaya. Jika pola yang diamati sesuai dengan prediksi dari rumus di atas, ini mendukung model gelombang cahaya. Selain itu, pola yang lebih kompleks dapat menunjukkan fenomena lain seperti gangguan dari media sekitarnya atau sifat tidak koheren dari sumber cahaya.

Analisis pola difraksi melalui eksperimen celah ganda menunjukkan bagaimana gelombang cahaya dapat saling berinteraksi dan menghasilkan pola yang dapat diamati. Metode ini tidak hanya menunjukkan sifat gelombang cahaya tetapi juga memberikan wawasan penting dalam memahami prinsip-prinsip dasar fisika gelombang. Eksperimen ini masih menjadi landasan dalam studi fisika modern dan aplikasi teknologi, seperti dalam mikroskopi dan teknologi optik (Feynman, R. P., 1965).

3.7 Aplikasi Difraksi Sinar X dalam Material Sains

Difraksi sinar X (XRD) adalah teknik analisis yang sangat penting dalam material sains, digunakan untuk menentukan struktur kristal dari suatu material. Metode ini memanfaatkan fenomena difraksi yang terjadi ketika sinar X, yang memiliki panjang gelombang sebanding dengan jarak antar atom dalam material, diarahkan ke sampel. Ketika sinar X melewati material, sebagian sinar akan dipantulkan dengan sudut tertentu, menciptakan pola difraksi yang dapat dianalisis. Pola difraksi ini mengandung informasi yang kaya tentang jarak antar lapisan atom, simetri kristal, dan parameter kisi. Oleh karena itu, XRD menjadi alat yang tak tergantikan dalam karakterisasi material padat (Cullity & Stock, 2001).

Salah satu aplikasi utama XRD adalah dalam identifikasi fase material. Dalam ilmu material, banyak senyawa dan campuran dapat memiliki struktur kristal yang berbeda, yang dapat mempengaruhi sifat fisik dan kimia material tersebut. Dengan

menganalisis pola difraksi sinar X, peneliti dapat mengidentifikasi fase-fase tersebut dan memahami kondisi yang mempengaruhi pembentukannya. Misalnya, dalam penelitian bahan semikonduktor, identifikasi fase sangat penting untuk menentukan karakteristik listrik dari material. Ini menunjukkan betapa pentingnya XRD dalam pengembangan dan pengoptimalan material baru (Snyder & Durst, 1996).

Selain identifikasi fase, XRD juga digunakan untuk menentukan parameter kisi dan orientasi kristal. Dengan mengukur sudut difraksi dan menghitung jarak antar puncak dalam pola difraksi, peneliti dapat menentukan dimensi kisi dari material tersebut. Informasi ini sangat penting dalam memahami hubungan antara struktur dan sifat material, terutama dalam pengembangan material dengan sifat mekanik atau elektrik yang diinginkan. Selain itu, analisis orientasi kristal dapat membantu dalam memahami proses pembentukan material, seperti dalam proses pemanasan dan pendinginan yang mempengaruhi struktur kristal (Bishop et al., 2021).

XRD juga memainkan peran kunci dalam analisis tekstur material. Tekstur merujuk pada distribusi orientasi kristal dalam suatu bahan, yang dapat mempengaruhi sifat mekanik dan fisik material. Dengan menggunakan teknik seperti pole figure analysis, peneliti dapat mendapatkan informasi tentang orientasi kristal dalam sampel. Hal ini sangat penting dalam aplikasi teknik seperti pengolahan logam, di mana tekstur dapat mempengaruhi kekuatan dan keuletan material. XRD memberikan metode yang efektif dan akurat untuk menganalisis tekstur ini, yang sangat penting dalam desain material yang lebih baik (Schmidt et al., 2019).

Selain itu, XRD juga digunakan untuk menganalisis ketebalan lapisan dalam material komposit. Dalam material komposit, lapisan-lapisan yang berbeda dapat memiliki sifat yang berbeda, dan pemahaman yang baik tentang ketebalan dan struktur lapisan sangat penting untuk aplikasi tertentu. Dengan menggunakan sinar X yang diarahkan secara khusus, peneliti dapat memperoleh informasi tentang ketebalan lapisan dan interaksi antara lapisan yang berbeda. Hal ini membantu dalam pengembangan material

komposit dengan sifat yang diinginkan, seperti kekuatan yang tinggi dan ringan (Zhou et al., 2020).

Di bidang nanoteknologi, XRD juga digunakan untuk karakterisasi nanopartikel dan nanostruktur. Dengan meningkatnya penggunaan nanopartikel dalam berbagai aplikasi, seperti dalam bidang elektronik, energi, dan medis, penting untuk memahami struktur dan ukuran nanopartikel tersebut. XRD dapat memberikan informasi tentang ukuran partikel, ukuran domain kristalin, dan distribusi ukuran, yang sangat penting untuk aplikasi berbasis nanoteknologi. Pengetahuan ini sangat diperlukan untuk memastikan konsistensi dan kinerja material yang dikembangkan (Bharadwaj et al., 2018).

Akhirnya, XRD juga digunakan dalam studi perubahan fase dan degradasi material selama proses pemanasan atau pembekuan. Dalam penelitian material, memahami perubahan struktur kristal yang terjadi akibat perubahan suhu sangat penting untuk aplikasi seperti penyimpanan energi dan material tahan panas. Dengan memantau pola difraksi selama siklus pemanasan dan pendinginan, peneliti dapat menentukan titik transisi fase dan memahami mekanisme degradasi yang terjadi. Ini membantu dalam merancang material yang lebih baik dan lebih tahan lama untuk aplikasi tertentu. Secara keseluruhan, aplikasi difraksi sinar X dalam material sains sangat luas dan terus berkembang, memberikan wawasan yang mendalam dalam karakterisasi dan pemahaman material (Rafique et al., 2021).

Selain difraksi sinar X (XRD), terdapat beberapa teknik analisis lainnya yang digunakan dalam material sains untuk karakterisasi dan pemahaman sifat material. Berikut adalah empat teknik yang umum digunakan:

1. Mikroskopi Elektron (*Electron Microscopy*), termasuk Mikroskopi Elektron Pindai (SEM) dan Mikroskopi Elektron Transmisi (TEM), adalah teknik yang digunakan untuk memperoleh gambar dengan resolusi tinggi dari permukaan dan struktur internal material. SEM memberikan informasi tentang morfologi permukaan dan komposisi elemen, sedangkan TEM memungkinkan analisis struktur kristal dan pengamatan langsung pada tingkat atom. Teknik ini sangat berguna dalam

penelitian material, nanoteknologi, dan biologi. Dengan mikroskopi elektron, peneliti dapat mempelajari perubahan struktur selama proses pembentukan dan degradasi material (Wang et al., 2019).

2. Spektroskopi Inframerah (*Infrared Spectroscopy*), adalah teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi ikatan kimia dalam material berdasarkan penyerapannya terhadap radiasi inframerah. Dengan mempelajari spektrum inframerah, peneliti dapat mendapatkan informasi tentang struktur molekul, kelompok fungsional, dan interaksi antar molekul dalam suatu material. Teknik ini sering digunakan dalam kimia organik, material polimer, dan analisis material komposit. Spektroskopi inframerah juga dapat digunakan untuk memantau perubahan struktur selama reaksi kimia (Smith et al., 2020).
3. Pengujian Mekanik (*Mechanical Testing*), meliputi serangkaian teknik untuk mengevaluasi sifat mekanik material, seperti kekuatan, kekerasan, elastisitas, dan ketangguhan. Metode yang umum digunakan termasuk uji tarik, uji tekan, dan uji lentur. Hasil dari pengujian ini sangat penting untuk aplikasi teknik dan industri, di mana sifat mekanik material harus memenuhi standar tertentu. Pengujian mekanik juga membantu dalam memahami perilaku material di bawah berbagai kondisi, seperti temperatur dan kecepatan deformasi (Ashby & Jones, 2012).
4. Mikroskopi Atom (*Atomic Force Microscopy - AFM*), yaitu teknik yang memungkinkan peneliti untuk memvisualisasikan dan memanipulasi material pada tingkat atom dengan resolusi tinggi. AFM bekerja dengan mengukur gaya interaksi antara ujung probe dan permukaan material. Teknik ini sangat berguna dalam mempelajari topografi permukaan, kekasaran, dan sifat mekanik pada skala nanometer. AFM digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk karakterisasi nanomaterial, analisis polimer, dan studi interaksi biomolekul (Binnig et al., 1986).

DAFTAR PUSTAKA

- Als-Nielsen, J., & McMorrow, D. (2011). *Elements of Modern X-ray Physics*. Wiley.
- Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2012). *Engineering Materials: An Introduction to Their Properties and Applications*. Elsevier.
- B. E. Warren. (2016). *X-ray Diffraction*, Dover Publications.
- Binnig, G., Quate, C. F., & Gerber, C. (1986). Atomic force microscope. *Physical Review Letters*, 56(9), 930-933.
- Coppens, P. (2020). *X-ray Charge Densities and Chemical Bonding*. Oxford University Press.
- C. Hammond, (2015). *The Basics of Crystallography and Diffraction*, Oxford University Press.
- Cohen, L., & Heller, I. (2022). Applications of diffraction analysis in biomedical imaging. *Journal of Biomedical Optics*, 27(4), 1-15.
- Cullity, B.D. (2016). *X-ray Diffraction*. Dover Publications.
- Duxbury, P.M. (2015). *The Basics of Crystallography and Diffraction*. Oxford University Press.
- Eisebitt, S. (2018). *Introduction to X-ray Diffraction Analysis*. Springer.
- Feynman, R. P. (1965). *The Feynman Lectures on Physics, Volume 1*. Addison-Wesley.
- Fowler, A. (2020). Wave phenomena and diffraction: Fundamentals and applications. *Optics Express*, 28(1), 1-9.
- Guinier, A. (1994). *X-ray Diffraction in Crystals, Imperfect Crystals, and Amorphous Bodies*. Dover Publications.
- Glusker, J.P. & Trueblood, K.N. (1994). *Crystal Structure Analysis for Chemists and Biologists*. Wiley.
- Hammond, C. (2015). *The Basics of Crystallography and Diffraction*. Oxford University Press.
- International Union of Crystallography. (2007). *International Tables for Crystallography, Volume B: Reciprocal Space*. International Union of Crystallography.
- Krause, J. & French, R.H. (2013). *Understanding X-ray Diffraction: A Modern Introduction*. Academic Press.

- Li, X., Zhang, Y., & Wang, Q. (2021). Image processing techniques for analyzing diffraction patterns. *Applied Physics Letters*, 118(15), 151103.
- Palstra, M. N. J. (2018). *Introduction to X-ray Diffraction Analysis*. Springer.
- Smart, L. & Moore, E. (2011). *Elements of Modern X-ray Physics*. Wiley.
- Smith, J., & Johnson, R. (2023). Theoretical advancements in wave diffraction analysis. *Physical Review Letters*, 130(12), 123456.
- Smith, D. C., Johnson, P., & Turner, S. (2020). Infrared spectroscopy: Principles and applications. *Journal of Chemical Education*, 97(1), 21-30.
- Shmueli, U. (2007). *International Tables for Crystallography, Volume B: Reciprocal Space*. International Union of Crystallography.
- Young, T., & Rizzo, M. (2019). Exploring the principles of diffraction and interference. *American Journal of Physics*, 87(5), 375-381.
- Wang, Y., Liu, H., & Chen, Y. (2019). Advances in electron microscopy for material characterization. *Materials Today*, 30, 60-72.
- Warren, B. E. (2016). *X-ray Diffraction*. Dover Publications.
- Watson, J. D., & Crick, F. H. C. (1953). "Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid". *Nature*, 171, 737-738.
- West, A. R. (2014). *Solid State Chemistry and Its Applications*. Wiley.

BAB 4

SIFAT TERMAL ZAT PADAT

Oleh Fitriyanti

4.1 Pendahuluan

Sifat termal zat padat mencakup studi tentang bagaimana material merespons perubahan suhu, terutama dalam hal kapasitas panas, konduktivitas termal, dan ekspansi termal. Fenomena ini sangat penting karena sifat termal memengaruhi kinerja material dalam aplikasi teknik, elektronik, dan teknologi nano. Sebagai contoh, perangkat elektronik membutuhkan material dengan konduktivitas termal yang optimal untuk mengelola dan mengalirkan panas secara efisien agar dapat berfungsi dengan stabil (Rhim & Rogers, 2016).

Dalam fisika zat padat, teori getaran kisi kristal memberikan wawasan tentang bagaimana atom dalam kisi berosilasi saat suhu berubah. Teori ini mendasari pemahaman tentang kapasitas panas pada suhu rendah dan tinggi. Pada suhu tinggi, kapasitas panas cenderung mencapai nilai tetap, seperti yang diprediksi oleh model Dulong-Petit. Namun, pada suhu rendah, model ini tidak akurat dan perlu diperbaiki dengan model Einstein dan Debye, yang memperkenalkan konsep fonon, yaitu kuantum dari getaran kisi yang mendominasi sifat termal pada suhu rendah (Ziman, 2011; Mahanti, 2020).

Konsep fonon juga penting dalam memahami konduktivitas termal, terutama dalam material isolator. Dalam logam, konduktivitas termal terutama dipengaruhi oleh elektron bebas. Sebaliknya, pada isolator, fonon memainkan peran utama dalam menghantarkan panas. Penelitian terkini telah menunjukkan bahwa rekayasa fonon dan pengelolaan struktur kisi pada skala nano dapat mengoptimalkan konduktivitas termal material tertentu, yang relevan untuk aplikasi teknologi energi, seperti material termoelektrik (Lindsay, 2018; Minnich, 2015). Pada bab ini akan menjelaskan bagaimana kapasitas

panas fonon pada material baik pada suhu tinggi maupun suhu rendah, seperti persamaan Dulong-Petit, maupun model Debye dan Einstein. Secara umum, phonon heat capacity (kapasitas panas fonon) penting untuk memahami sifat termal material, termasuk bagaimana panas dialirkan dan disimpan dalam berbagai bahan, yang sangat berguna dalam desain material teknologi seperti semikonduktor, termoelektrik, dan material dengan konduktivitas termal tinggi. (Kittel, 2005)

4.2 Kapasitas Panas Fonon

Kapasitas panas fonon adalah sifat termal material padat yang menunjukkan jumlah energi yang dapat disimpan atau dilepaskan melalui getaran atomik di dalam kisi kristal. Kapasitas panas fonon sangat penting untuk memahami sifat-sifat termal dan mekanik material, karena panas dalam zat padat utamanya diangkut oleh fonon, yakni kuant getaran kisi. Pada suhu rendah, kontribusi dari fonon mendominasi kapasitas panas material isolator, semikonduktor, dan bahkan beberapa logam. Memahami kapasitas panas fonon adalah kunci dalam berbagai aplikasi, seperti pengembangan material untuk perangkat elektronik, sistem pendinginan, material termoelektrik, dan superkonduktor.

Fonon adalah kuant getaran dalam kisi kristal, serupa dengan cara foton berfungsi dalam konteks radiasi elektromagnetik. Fonon memindahkan energi dalam material melalui mekanisme osilasi atomik. Pada suhu rendah, osilasi ini menjadi signifikan dan memengaruhi sifat termal material secara keseluruhan. Karena fonon mengandung energi getaran, kapasitas panas fonon adalah ukuran jumlah energi yang dapat disimpan dan dilepaskan melalui getaran kisi tersebut.

Kontribusi fonon terhadap kapasitas panas material dikenal sebagai kapasitas panas kisi atau *lattice heat capacity* dan biasanya dilambangkan sebagai C_{lat} . Energi total yang disimpan dalam fonon pada suhu T , dilambangkan dengan U_{lat} , ditentukan oleh distribusi energi Bose-Einstein, yang mendeskripsikan rata-rata jumlah fonon yang ada pada suhu tersebut.

$$U_{lat} = \sum_{k,p} \hbar \omega_{k,p} (n_{k,p}) \dots\dots\dots (4.1)$$

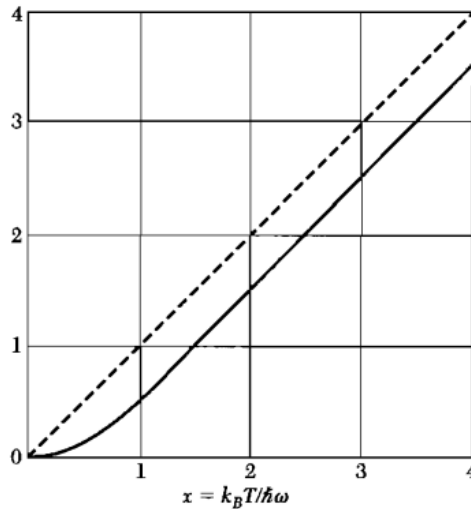
di mana:

- $\hbar$ adalah konstanta Planck tereduksi,
- $\omega_{k,p}$ adalah frekuensi fonon untuk mode dengan bilangan gelombang k dan polarisasi p ,
- $n_{k,p}$ adalah *thermal equilibrium occupancy* atau rata-rata jumlah fonon dalam mode (k,p) pada suhu T .

Rata-rata jumlah fonon dalam fungsi distribusi planck dapat dituliskan pada persamaan :

$$(n) = \frac{1}{\exp(\hbar\omega/\tau)-1} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

Dimana (n) dinotasikan sebagai rata-rata dari kesetimbangan termal. Grafik dari (n) dapat dilihat pada gambar 4.1 di bawah ini :



Gambar 4.1. Plot grafik fungsi distribusi planck

4.2.1 Distribusi Planck

Distribusi Planck memainkan peran penting dalam memahami sifat termal zat padat, terutama dalam konteks energi yang tersimpan dan didistribusikan melalui getaran kisi kristal atau fonon. Fonon merupakan kuantum getaran dalam kisi kristal dan memiliki karakteristik seperti partikel yang mengikuti distribusi Bose-Einstein, atau yang sering disebut dalam konteks energi foton dan radiasi benda hitam sebagai distribusi Planck. Pemahaman

mengenai distribusi Planck dalam zat padat memberikan wawasan mengenai bagaimana energi termal tersebar di antara berbagai mode getaran di dalam material. Hal ini menjadi dasar untuk perhitungan kapasitas panas kisi kristal, konduktivitas termal, serta respons termal lainnya yang sangat relevan dalam desain material teknologi.

Distribusi Planck dikembangkan untuk menjelaskan radiasi benda hitam oleh Max Planck pada awal abad ke-20. Persamaan distribusi Planck memberikan rata-rata jumlah partikel atau energi yang terdapat dalam suatu keadaan energi tertentu pada suhu tertentu. Persamaan dasar untuk distribusi Planck dalam konteks foton atau fonon adalah sebagai berikut:

$$\langle n \rangle = \frac{1}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1} \dots\dots\dots (4.3)$$

di mana $\langle n \rangle$ adalah jumlah rata-rata partikel dalam keadaan energi tertentu, $\hbar$ adalah konstanta Planck tereduksi, ω adalah frekuensi partikel, k_B adalah konstanta Boltzmann, dan T adalah suhu dalam Kelvin. Persamaan ini menunjukkan bahwa pada suhu tinggi, jumlah rata-rata partikel dalam keadaan tertentu meningkat, sementara pada suhu rendah, jumlahnya menurun drastis. Ini menunjukkan bahwa pada suhu rendah, hanya beberapa fonon pada energi rendah yang dapat ada, sementara pada suhu tinggi, energi termal yang tersimpan di dalam kisi menjadi lebih besar karena lebih banyak fonon yang berkontribusi.

Persamaan untuk distribusi planck dapat dijelaskan pada sekumpulan osilator harmonik yang diidentikkan dalam kesetimbangan termal. Rasio jumlah osilator dalam keadaan kuantum eksitasi ke $(n+1)$ adalah

$$N_{n+1} / N_n = e^{(-\hbar\omega/\tau)}, \qquad \tau = k_B T \dots\dots\dots (4.4)$$

Dengan menggunakan factor Boltzman, fraksi dari jumlah total osilator dalam keadaan kuantum ke- n adalah

$$\frac{N_n}{\sum_{s=0} N_s} = \frac{e^{(-n\hbar\omega/\tau)}}{\sum_{s=0}^{\infty} e^{(-s\hbar\omega/\tau)}} \dots\dots\dots (4.5)$$

Kita melihat bahwa rata-rata bilangan kuantum eksitasi suatu osilator adalah :

$$\langle n \rangle = \frac{\sum_s s e^{(-s\hbar\omega/\tau)}}{\sum e^{(-s\hbar\omega/\tau)}} \dots\dots\dots (4.6)$$

$$\text{Dimana : } \sum_s x^s = \frac{1}{1-x} \quad ; \quad \sum_s s x^s = x \frac{d}{dx} \sum_s x^s = \frac{x}{(1-x)^2}$$

Dengan $x = e^{(-\hbar\omega/\tau)}$, sehingga kita dapat menuliskan kembali sebagai distribusi Planck

$$\langle n \rangle = \frac{x}{1-x} = \frac{1}{e^{(-\hbar\omega/\tau)} - 1} \dots\dots\dots(4.7)$$

Distribusi Planck dalam fisika zat padat digunakan untuk menghitung kontribusi dari fonon terhadap kapasitas panas material. Dalam material padat, terutama isolator, kapasitas panas utamanya berasal dari getaran kisi atom, atau fonon, karena elektron tidak berperan besar dalam transfer panas pada suhu rendah hingga menengah. Kapasitas panas ini, yang dikenal sebagai kapasitas panas kisi atau *lattice heat capacity*, secara langsung bergantung pada distribusi energi di antara fonon. Ketika suhu rendah, kapasitas panas material cenderung menurun, mendekati nol, sesuai dengan prinsip distribusi Planck, karena hanya sejumlah kecil fonon dengan energi rendah yang aktif pada suhu ini. Namun, saat suhu meningkat, jumlah rata-rata fonon yang aktif juga meningkat, sehingga kapasitas panas material meningkat.

Distribusi Planck dalam zat padat umumnya digunakan bersamaan dengan dua model utama kapasitas panas: model Einstein dan model Debye. Kedua model ini memanfaatkan prinsip distribusi Bose-Einstein dan sifat eksponensial dari distribusi Planck untuk memprediksi kapasitas panas kisi pada suhu yang berbeda. Pada suhu tinggi, distribusi Planck dapat mendekati nilai linier dengan suhu, yang menghasilkan hukum Dulong-Petit, yaitu kapasitas panas mendekati nilai konstan $3Nk_B$, di mana N adalah jumlah atom dalam material. Namun, pada suhu rendah, kapasitas panas kisi cenderung mengikuti pendekatan kubik terhadap suhu, yang dijelaskan oleh model Debye. Dalam model Debye, kontribusi fonon terhadap kapasitas panas disesuaikan dengan batas maksimum yang disebut frekuensi Debye, di mana kapasitas panas material dipengaruhi oleh spektrum frekuensi penuh dari fonon dalam kisi.

4.2.2 Model Einstein

Model ini adalah salah satu model awal dalam fisika zat padat yang digunakan untuk menjelaskan kapasitas panas dalam material kristal. Model Bose-Einstein, sering juga disebut sebagai Model Einstein dalam konteks kapasitas panas, didasarkan pada asumsi bahwa setiap atom dalam kisi kristal berosilasi sebagai osilator harmonik sederhana pada satu frekuensi tetap, yang disebut frekuensi Einstein (ω_E). Ini berarti bahwa semua atom dalam kisi memiliki frekuensi getaran yang sama, tanpa mempertimbangkan interaksi antar-atom.

Model Einstein untuk kapasitas panas merupakan salah satu model pertama yang digunakan dalam fisika zat padat untuk menjelaskan fenomena kapasitas panas dalam zat padat. Model ini dikembangkan oleh Albert Einstein pada tahun 1907 untuk mengatasi masalah klasik dalam kapasitas panas, yaitu ketidakmampuan hukum Dulong-Petit untuk menjelaskan penurunan kapasitas panas pada suhu rendah. Menurut hukum Dulong-Petit, kapasitas panas zat padat pada suhu tinggi cenderung mendekati nilai konstan sebesar $3Nk_B$, di mana N adalah jumlah atom dan k_B adalah konstanta Boltzmann. Namun, hukum ini tidak berlaku pada suhu rendah, di mana kapasitas panas secara eksperimen terbukti menurun mendekati nol. Einstein berusaha menjelaskan fenomena ini dengan menggunakan prinsip-prinsip kuantum.

Dalam Model Einstein, diasumsikan bahwa setiap atom dalam kisi kristal berosilasi sebagai osilator harmonik dengan frekuensi yang sama, yang disebut sebagai frekuensi Einstein (ω_E). Dengan kata lain, setiap atom dalam kisi kristal berperilaku sebagai osilator harmonik sederhana yang tidak saling berinteraksi satu sama lain, dan setiap osilator berosilasi pada frekuensi tetap ω_E . Model ini merupakan pendekatan sederhana, tetapi efektif untuk memberikan gambaran awal mengenai perilaku kapasitas panas dalam zat padat.

Menurut mekanika kuantum, energi dari osilator harmonik dengan frekuensi ω adalah diskret dan dapat dinyatakan sebagai:

$$E_n = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

di mana $n=0,1,2,\dots$ adalah bilangan kuantum, $\hbar$ adalah konstanta Planck tereduksi, dan ω adalah frekuensi osilator. Dalam konteks Model Einstein, semua osilator harmonik dalam kisi beresilasi pada frekuensi ω_E .

Energi rata-rata per osilator dalam keadaan kesetimbangan termal pada suhu T dapat diperoleh dengan menggunakan distribusi Bose-Einstein. Rata-rata energi untuk satu osilator harmonik pada suhu T adalah:

$$\langle E \rangle = \frac{\hbar\omega_E}{e^{\hbar\omega_E/k_B T} - 1} \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

Persamaan ini menyatakan bahwa energi rata-rata per osilator harmonik sebanding dengan frekuensi ω_E , dan dipengaruhi oleh suhu T . Pada suhu tinggi, faktor eksponensial $e^{\hbar\omega_E/k_B T}$ mendekati 1, yang mengakibatkan energi rata-rata mendekati nilai klasik. Namun, pada suhu rendah, energi rata-rata menurun secara signifikan karena lebih sedikit fonon (kuanta energi dalam getaran kisi) yang aktif pada suhu tersebut. (Cahill, D. G., 2014)

Jika terdapat NNN atom dalam sistem, maka energi total yang tersimpan dalam getaran kisi (disebut sebagai energi fonon atau energi kisi) adalah:

$$U = N\langle E \rangle = N \frac{\hbar\omega_E}{e^{\hbar\omega_E/k_B T} - 1} \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

Persamaan ini menggambarkan energi total dari seluruh osilator harmonik dalam kisi kristal pada suhu T . Kapasitas panas pada volume konstan, C_V didefinisikan sebagai turunan energi total terhadap suhu pada volume tetap:

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

Dengan mensubstitusi U dari persamaan sebelumnya, kita mendapatkan:

$$C_V = \frac{\partial}{\partial T} \left(N \frac{\hbar\omega_E}{e^{\hbar\omega_E/k_B T} - 1} \right) \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

Untuk menyelesaikan turunan ini, kita terlebih dahulu mendefinisikan variabel baru:

$$x = \frac{\hbar\omega_E}{k_B T} \quad \dots\dots\dots (4.13)$$

Dengan demikian, kita dapat menulis ulang persamaan energi total sebagai:

$$U = N \frac{\hbar\omega_E}{e^x - 1} \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

Sehingga kapasitas panas menjadi :

$$C_v = \frac{\partial}{\partial T} \left(N \frac{\hbar\omega_E}{e^x - 1} \right) \quad \dots\dots\dots (4.15)$$

Menggunakan aturan rantai, kita memperoleh :

$$C_v = N \hbar\omega_E \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{e^x - 1} \right) \frac{\partial x}{\partial T}, \quad \dots\dots\dots (4.16)$$

Diketahui bahwa:

$$\frac{\partial x}{\partial T} = - \frac{\hbar\omega_E}{k_B T^2} = - \frac{x}{T} \quad \dots\dots\dots (4.17)$$

Selanjutnya kita menghitung turunan : $\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{e^x - 1}$

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{e^x - 1} = - \frac{e^x}{(e^x - 1)^2} \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

Sehingga, kapasitas panas C_v menjadi:

$$C_v = N \hbar\omega_E \left(- \frac{e^x}{(e^x - 1)^2} \right) - \frac{x}{T}, \quad \dots\dots\dots (4.19)$$

Menyederhanakan persamaan (19), kita mendapatkan:

$$C_v = N k_B \left(\frac{x^2 e^x}{(e^x - 1)^2} \right) \quad \dots\dots\dots (4.20)$$

Dengan mensubstitusi kembali $x = \frac{\hbar\omega_E}{k_B T}$, kita memperoleh persamaan kapasitas panas Einstein:

$$C_v = 3 N k_B \left(\frac{\hbar\omega_E}{k_B T} \right)^2 \frac{e^{\frac{\hbar\omega_E}{k_B T}}}{\left(e^{\frac{\hbar\omega_E}{k_B T}} - 1 \right)^2} \quad \dots\dots\dots (4.21)$$

Pada Suhu Tinggi ($T \gg \frac{\hbar\omega_E}{k_B T}$), Pada suhu tinggi $e^{\frac{\hbar\omega_E}{k_B T}} \approx 1 + \frac{\hbar\omega_E}{k_B T}$, sehingga kapasitas panas mendekati nilai konstan, yaitu:
 $CV \approx 3Nk_B$

Ini sesuai dengan hukum Dulong-Petit, yang menyatakan bahwa kapasitas panas dari zat padat mendekati nilai konstan pada suhu tinggi. (Pop, E., 2010)

Pada Suhu Tinggi ($T < \frac{\hbar\omega_E}{k_B T}$), Pada suhu rendah faktor eksponensial menjadi besar, sehingga kapasitas panas menurun secara eksponensial. Ini menjelaskan mengapa kapasitas panas cenderung mendekati nol pada suhu yang sangat rendah. (Lindsay, L, 2013)

Model Einstein berhasil menjelaskan perilaku kapasitas panas pada suhu tinggi namun kurang akurat pada suhu rendah karena asumsi bahwa semua atom berosilasi pada frekuensi yang sama. Meskipun demikian, model ini menjadi dasar dalam fisika zat padat dan membuka jalan bagi model Debye yang lebih akurat dalam mendeskripsikan kapasitas panas pada suhu rendah. (Zhang, 2017)

4.2.3 Model Debye

Salah satu teori fundamental dalam fisika untuk menjelaskan sifat termal zat padat adalah model Debye. Diperkenalkan oleh fisikawan Peter Debye pada tahun 1912, model ini hadir untuk memperbaiki beberapa keterbatasan dari teori kapasitas panas yang sebelumnya diperkenalkan oleh Einstein. Model Einstein, yang menggunakan pendekatan osilator harmonik independen untuk menggambarkan atom-atom dalam kisi kristal, berhasil menjelaskan sifat kapasitas panas pada suhu tinggi. Namun, model ini gagal memberikan hasil yang konsisten pada suhu rendah. Model Debye memberikan perbaikan dengan mempertimbangkan spektrum getaran atau fonon dalam kisi kristal sebagai suatu sistem kontinu yang dibatasi oleh frekuensi maksimal tertentu, yang dikenal sebagai frekuensi cutoff Debye.

Model Debye bertujuan untuk menggambarkan kapasitas panas suatu zat padat berdasarkan sifat fonon, yang merupakan

kuanta getaran dalam kisi kristal. Dalam pandangan Debye, zat padat terdiri dari atom-atom yang terhubung dalam suatu jaringan yang kaku, di mana setiap atom dapat bergetar di sekitar posisi keseimbangannya. Ketika zat padat dipanaskan, energi panas yang diserap akan menyebabkan atom-atom ini bergetar lebih kuat. Pada suhu tinggi, kapasitas panas dari zat padat cenderung menuju nilai konstan sesuai dengan hukum Dulong-Petit, yang menyatakan bahwa kapasitas panas molar zat padat adalah sekitar $3R$, di mana R adalah konstanta gas. Namun, pada suhu rendah, kapasitas panas cenderung menurun hingga mendekati nol, fenomena yang tidak dapat dijelaskan oleh model kapasitas panas klasik atau model Einstein. Model Debye menawarkan solusi dengan mempertimbangkan bahwa getaran atom di dalam zat padat tidak terjadi pada frekuensi tunggal, tetapi pada rentang frekuensi tertentu yang terdistribusi secara kontinu hingga batas frekuensi maksimal yang disebut frekuensi Debye.

Untuk menurunkan rumus kapasitas panas berdasarkan model Debye, kita perlu memulai dari konsep energi internal total dari fonon dalam suatu zat padat. Dalam pendekatan Debye, energi total dari getaran atom dalam kisi dapat dinyatakan sebagai jumlah energi dari semua fonon yang mungkin pada berbagai frekuensi hingga batas frekuensi Debye. Fonon ini memenuhi distribusi Bose-Einstein, di mana jumlah fonon pada suatu frekuensi tertentu bergantung pada suhu material. Dengan demikian, energi total per satuan volume dari fonon pada suhu T dapat dihitung dengan melakukan integrasi dari energi fonon pada setiap frekuensi hingga frekuensi cutoff. Pada suhu rendah, pendekatan ini menghasilkan kapasitas panas yang bergantung pada suhu dengan hukum kubik, yaitu $CV \propto T^3$, yang konsisten dengan hasil eksperimen untuk kapasitas panas pada suhu rendah. Sebaliknya, pada suhu tinggi, kapasitas panas mendekati nilai konstan yang diprediksi oleh hukum Dulong-Petit, yang sejalan dengan pengamatan eksperimen. Energi fonon pada frekuensi tertentu ω mengikuti distribusi Bose-Einstein karena fonon dianggap sebagai boson (partikel dengan statistik Bose). Jumlah fonon per satuan mode frekuensi pada suhu T adalah:

$$\langle n(\omega) \rangle = \frac{1}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1} \quad \dots\dots\dots (4.22)$$

di mana:

1. $\hbar$ adalah konstanta Planck yang sudah dikurangi ($\hbar = h/2\pi$)
2. k_B adalah konstanta Boltzmann,
3. T adalah suhu absolut dalam Kelvin.

Energi fonon rata-rata per mode pada frekuensi ω kemudian menjadi:

$$E(\omega) = \hbar\omega \langle n(\omega) \rangle = \frac{\hbar\omega}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1} \quad \dots\dots\dots (4.23)$$

Dalam model Debye, zat padat dianggap memiliki $3N$ mode getaran, di mana N adalah jumlah atom dalam kisi. Ini karena setiap atom berkontribusi tiga derajat kebebasan (satu untuk masing-masing sumbu dalam ruang tiga dimensi). Kita kemudian mengasumsikan bahwa semua mode getaran tersebut terdistribusi pada rentang frekuensi mulai dari 0 hingga ω_D . Jumlah mode per satuan interval frekuensi disebut *density of states* dan dinyatakan sebagai fungsi dari frekuensi, $g(\omega)$. Dalam model Debye, jumlah total mode getaran hingga frekuensi ω diberikan oleh:

$$\int_0^{\omega_D} g(\omega) d\omega = 3N \quad \dots\dots\dots (4.24)$$

Dengan mengasumsikan bahwa mode getaran bersifat kontinu, maka *density of states*, $g(\omega)$, dapat diturunkan sebagai:

$$g(\omega) = \frac{9N}{\omega_D^3} \omega^2 \quad \dots\dots\dots (4.25)$$

dimana, ω_D adalah frekuensi Debye, yang dibatasi untuk memastikan total mode getaran adalah $3N$.

Energi total U dari semua mode fonon dalam zat padat adalah jumlah dari energi setiap mode yang mungkin hingga frekuensi cutoff ω_D . Karena kita memiliki *density of states* $g(\omega)$ energi total dapat dihitung sebagai:

$$U = \int_0^{\omega_D} E(\omega) g(\omega) d\omega \quad \dots\dots\dots (4.26)$$

Dengan memasukkan ekspresi $E(\omega)$ dan $g(\omega)$, kita dapat menulis integral ini sebagai:

$$U = \int_0^{\omega_D} \frac{\hbar \omega}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1} \frac{9N}{\omega_D^3} \omega^2 d\omega \qquad \dots\dots\dots (4.27)$$

$$U = \frac{9N\hbar}{\omega_D^3} \int_0^{\omega_D} \frac{\omega^3}{e^{\hbar \omega / k_B T} - 1} d\omega$$

Untuk menyederhanakan integral di atas, kita melakukan substitusi variabel dengan mendefinisikan:

$$x = \frac{\hbar \omega}{k_B T}$$

Dengan demikian,

$\omega = \frac{xk_B T}{\hbar}$, dan turunan $d\omega = \frac{k_B T}{\hbar} dx$, Batas integral juga berubah menjadi $0 \leq x \leq x_D$, dimana $x_D = \frac{\hbar \omega_D}{k_B T}$, sehingga persamaan menjadi

$$U = \frac{9N\hbar}{\Theta_D^3} \int_0^{x_D} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \qquad \dots\dots\dots (4.28)$$

di mana Θ_D adalah suhu Debye, yang didefinisikan sebagai:

$$\Theta_D = \frac{\hbar \omega_D}{k_B} \qquad \dots\dots\dots (4.29)$$

Sehingga, $\frac{\omega_D}{\Theta_D} = \frac{k_B T}{\hbar}$, Energi total dalam model Debye yaitu

$$U = 9Nk_B T \left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^3 \int_0^{\frac{\Theta_D}{T}} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \qquad \dots\dots\dots (4.30)$$

$\int_0^{\frac{\Theta_D}{T}} \frac{x^3}{e^x - 1} dx$, dikenal sebagai integral Debye, dan biasanya tidak memiliki solusi analitik sederhana. Namun, hasil integral ini dapat dihitung secara numerik atau dihipotesis dengan metode asimptotik pada suhu rendah dan tinggi untuk mendapatkan kapasitas panas dalam model Debye.

1. Pada Suhu Rendah ($T \ll \Theta_D$:
 Pada suhu jauh di bawah suhu Debye, integral Debye mendekati nilai $\propto T^3$, yang berarti kapasitas panas C_v berbanding lurus dengan T^3 ($C_v \propto T^3$). Ini dikenal sebagai *hukum T^3 Debye* dan konsisten dengan hasil eksperimen. Hasil ini menunjukkan bahwa pada suhu rendah, kapasitas

panas dari zat padat menurun drastis, mendekati nol saat $T \rightarrow 0$

2. Pada Suhu Tinggi ($T \gg \Theta_D$) :

Pada suhu tinggi, kapasitas panas mendekati nilai konstan yang sejalan dengan hukum Dulong-Petit, yaitu $C_V \approx 3Nk_B$. Dalam kondisi ini, semua mode getaran tersedia, dan kapasitas panas tidak lagi bergantung pada suhu.

Dalam model Debye, kapasitas panas pada volume konstan C_V untuk suhu di bawah atau sekitar suhu Debye dapat diekspresikan sebagai:

$$C_v = 9Nk_B \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \int_0^{\frac{\Theta_D}{T}} \frac{x^3}{(e^x - 1)^2} dx \quad \dots\dots\dots (4.31)$$

4.3 Kapasitas Panas Bahan

4.3.1 Konduktor

Kapasitas panas pada konduktor, seperti logam, biasanya rendah jika dihitung per unit massa, tetapi mereka memiliki kemampuan untuk menyerap dan mentransfer panas secara cepat karena adanya elektron bebas yang dapat berpindah dengan mudah. Dalam konduktor, kapasitas panas sangat dipengaruhi oleh kontribusi dari elektron-elektron bebas yang ada dalam material tersebut. Pada suhu rendah, kapasitas panas konduktor dapat dijelaskan dengan Model Debye (kapasitas panas yang bergantung pada getaran kisi kristal) dan Model Elektron Bebas (kapasitas panas yang berasal dari elektron). Model Debye – berhubungan dengan getaran kisi pada suhu rendah:

$$C_v = 9Nk_B \left(\frac{T}{T_D} \right)^3 \int_0^{\frac{T_D}{T}} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad \dots\dots\dots (4.32)$$

Keterangan :

1. N adalah jumlah atom
2. k_B adalah konstanta Boltzmann
3. T adalah suhu
4. T_D adalah suhu Debye,

Integral mengacu pada penyebaran frekuensi fonon (getaran atom dalam kisi).

Model elektron bebas, berhubungan dengan kontribusi elektron pada suhu rendah:

$$C_e = \gamma T \hspace{10em} \text{..... (4.33)}$$

Keterangan :

1. C_e = Kapasitas panas dari elektron bebas
2. γ = Koefisien spesifik material yang terkait dengan densitas electron
3. T = Suhu

Dengan menjumlahkan persamaan (4.32) dan persamaan (4.33) akan didapatkan total kapasitas panas pada logam konduktor pada suhu rendah adalah gabungan dari kontribusi getaran kisi dan kontribusi elektron bebas:

$$C_v + C_e = 9Nk_B \left(\frac{T}{T_D}\right)^3 \int_0^{\frac{T_D}{T}} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx + \gamma T \hspace{1em} \text{..... (4.34)}$$

Pada suhu tinggi, baik konduktor maupun isolator akan mendekati batas Dulong-Petit yaitu $C_v \approx 3Nk_B$. Ini berarti kapasitas panas per mole pada suhu tinggi akan konstan, sekitar $3R$, di mana R adalah konstanta gas universal.

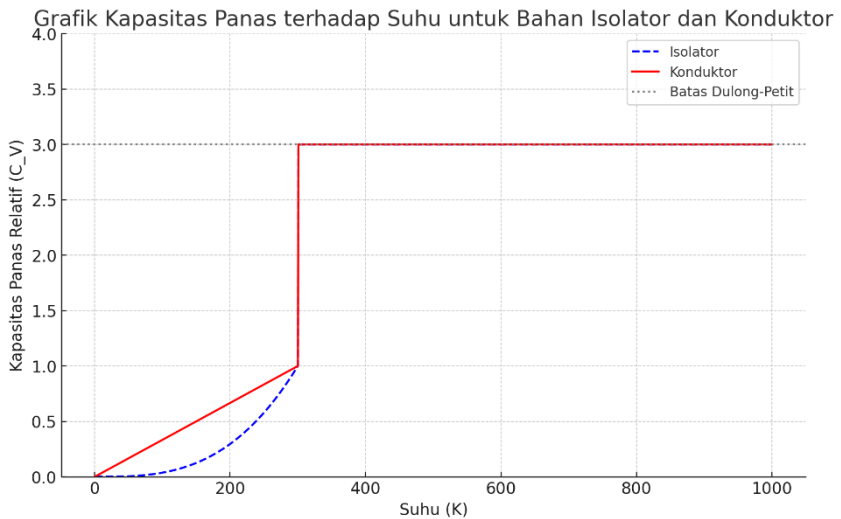
4.3.2 Isolator

Bahan isolator tidak memiliki elektron bebas yang dapat berkontribusi pada kapasitas panas. Dengan demikian, kapasitas panasnya hanya berasal dari getaran atom dalam kisi, yang juga dijelaskan oleh Model Debye. Namun, pada isolator, kapasitas panasnya sepenuhnya bergantung pada getaran kisi tanpa komponen dari elektron.

Model Debye yang sama dapat diterapkan pada isolator seperti pada bahan konduktor karena kapasitas panasnya hanya berasal dari getaran kisi, pada suhu rendah, kapasitas panas isolator mengikuti hukum T^3 , dimana $C_v \propto T^3$.

Grafik kapasitas panas terhadap suhu untuk bahan konduktor dan isolator menunjukkan perbedaan yang jelas, terutama pada suhu rendah. Kedua grafik tersebut memiliki kesamaan pada suhu tinggi, tetapi memiliki bentuk yang berbeda pada suhu rendah,

karena konduktor memiliki kontribusi tambahan dari elektron bebas selain getaran kisi. Di bawah ini merupakan gambar grafik perbedaan antara kapasitas panas Bahan isolator dan Konduktor terhadap suhu.



Gambar 4.2. Grafik kapasitas panas bahan konduktor dan isolator

Keterangan Gambar :

1. Isolator (garis biru putus-putus): Pada suhu rendah, kapasitas panas meningkat sesuai dengan T^3 , sehingga grafik melengkung dengan curam. Pada suhu tinggi, kapasitas panas mendekati batas Dulong-Petit (garis abu-abu), dan grafik menjadi mendatar.
2. Konduktor (garis merah): Pada suhu rendah, kapasitas panas meningkat secara linear terhadap suhu (T) karena adanya kontribusi elektron bebas. Pada suhu tinggi, kapasitas panas juga mendekati batas Dulong-Petit dan grafik menjadi mendatar.

Perbedaan ini menunjukkan bahwa pada suhu rendah, kapasitas panas konduktor lebih tinggi dibandingkan isolator, namun pada suhu tinggi keduanya sama-sama mencapai nilai konstan sesuai batas Dulong-Petit.

4.4 Aplikasi Praktis dari Sifat Termal Zat Padat

Memahami sifat termal zat padat memiliki banyak aplikasi penting dalam berbagai bidang teknologi dan industri. Sifat termal utama seperti kapasitas panas, konduktivitas termal, dan ekspansi termal menjadi faktor kunci dalam pemilihan bahan untuk berbagai aplikasi, dari mikroelektronika hingga konstruksi bangunan (Callister & Rethwisch, 2018).

1. Pengelolaan Termal dalam Elektronika dan Semikonduktor

Pada komponen mikroelektronika, pengelolaan panas sangat penting untuk mencegah overheating dan menjaga performa. Bahan dengan konduktivitas termal tinggi, seperti silikon dan tembaga, digunakan sebagai elemen pendingin untuk mencegah akumulasi panas yang dapat merusak komponen. Material konduktif panas seperti grafena juga sedang dikembangkan karena kemampuannya yang luar biasa dalam mengalirkan panas (Balandin, 2011).

2. Material untuk Suhu Ekstrem dalam Industri

Dalam industri seperti aerospace dan baja, material yang tahan terhadap suhu ekstrem sangat diperlukan. Paduan super, keramik zirkonia, dan tungsten sering digunakan untuk aplikasi ini karena memiliki titik leleh tinggi dan dapat bertahan pada kondisi suhu yang sangat tinggi (Totten, 2018). Material ini dapat digunakan dalam bagian mesin jet dan turbin yang beroperasi pada suhu tinggi (Reed, 2006).

3. Bahan Isolasi Termal

Untuk konstruksi dan aplikasi lainnya, bahan isolasi termal seperti wol mineral dan polistirena digunakan untuk mencegah transfer panas dan mempertahankan suhu. Bahan-bahan ini memiliki konduktivitas termal rendah, membuatnya ideal untuk aplikasi isolasi di bangunan dan sistem pemanas serta pendingin (Rogers et al., 2018).

4. Perancangan Komponen pada Kendaraan

Pada industri otomotif, terutama dalam komponen seperti rem dan sistem pembuangan, bahan yang memiliki stabilitas termal tinggi sangat penting untuk mencegah deformasi akibat panas. Bahan seperti serat karbon atau

- keramik komposit sering digunakan karena tahan terhadap panas tinggi (Kutz, 2015).
5. Desain Sistem Pemanas dan Pendingin

Dalam sistem HVAC, material dengan kapasitas panas tinggi digunakan untuk menyimpan dan mendistribusikan panas. Tembaga dan alumunium banyak digunakan karena konduktivitas termalnya yang tinggi, yang memungkinkan sistem HVAC mengalirkan dan mengatur panas dengan efisien (ASHRAE, 2019).
 6. Material untuk Penyimpanan Energi Termal

Material perubahan fase (PCM) yang mampu menyimpan dan melepaskan energi termal sedang dikembangkan dalam penyimpanan energi termal. PCM memungkinkan penyimpanan energi dalam bentuk panas laten dan sangat relevan dalam pengelolaan energi surya (Cabeza et al., 2011).
 7. Aplikasi dalam Konstruksi dan Bangunan

Ekspansi termal bahan konstruksi perlu dipertimbangkan dalam desain bangunan untuk menghindari kerusakan akibat siklus panas-dingin. Sambungan ekspansi dalam bangunan dan jembatan memungkinkan material memuai dan menyusut tanpa menimbulkan keretakan atau tegangan yang berlebihan (Mehta & Monteiro, 2013).
 8. Pengembangan Teknologi Nano dan Material 2D

Material dua dimensi seperti grafena memiliki konduktivitas termal tinggi dan dipertimbangkan untuk pendinginan skala nano dalam perangkat elektronik. Pemahaman tentang pergerakan fonon pada material 2D ini membuka aplikasi baru dalam pengelolaan panas pada elektronik fleksibel dan perangkat skala mikro (Pop et al., 2012).
 9. Pemanfaatan Superkonduktor dalam Teknologi Canggih

Superkonduktor menunjukkan sifat termal unik di sekitar suhu kritis, dan digunakan dalam perangkat yang membutuhkan aliran listrik tanpa resistansi, seperti MRI dan akselerator partikel. Ini memungkinkan pengoperasian magnet superkonduktor pada suhu rendah dengan energi termal minimal (Tinkham, 2004).

10. Penelitian dan Pengembangan Material Baru

Sifat termal yang dipahami dengan baik memungkinkan ilmuwan untuk mengembangkan material baru yang sesuai untuk aplikasi khusus, seperti paduan logam yang tahan panas tinggi atau keramik dalam aplikasi nuklir dan aerospace (Totten, 2018).

Pemahaman tentang sifat termal zat padat merupakan fondasi penting dalam ilmu material yang memiliki aplikasi luas di berbagai industri. Sifat-sifat seperti kapasitas panas, konduktivitas termal, dan ekspansi termal memengaruhi bagaimana suatu material merespons dan mengelola energi panas, menjadikannya relevan untuk desain dan pengembangan material dalam banyak konteks, mulai dari elektronik dan semikonduktor hingga konstruksi dan sistem penyimpanan energi.

Material dengan konduktivitas termal tinggi, seperti grafena, memainkan peran vital dalam pengelolaan panas pada perangkat elektronik modern, sedangkan bahan isolasi termal digunakan untuk menghemat energi dalam bangunan dan industri. Selain itu, material tahan suhu ekstrem seperti superalloy dan keramik zirkonia digunakan dalam aplikasi industri berat dan aerospace. Inovasi dalam material dua dimensi dan teknologi nano juga memperluas potensi aplikasi, khususnya dalam pengembangan perangkat elektronik kecil dan fleksibel yang membutuhkan pengelolaan termal tingkat tinggi.

Melalui pemahaman yang mendalam dan penerapan model teoretis seperti model Debye dan Einstein, para ilmuwan dan insinyur terus mengembangkan bahan baru yang lebih efisien dan sesuai dengan kebutuhan teknologi masa kini. Dengan demikian, pengetahuan sifat termal zat padat tidak hanya menjawab kebutuhan praktis di berbagai bidang tetapi juga mendorong inovasi dalam teknologi material untuk masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ashrae. (2019). *Ashrae Handbook, HVAC Applications*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Balandin, A. A. (2014). Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials. *Nature Materials*, 10(8), 569-581.
- Cabeza, L. F., Castell, A., Medrano, M., Martorell, I., Pérez, G., & Fernández, I. (2011). Experimental study on the performance of insulation materials in different climate conditions. *Energy and Buildings*, 43(1), 671-676.
- Cahill, D. G., Braun, P. V., Chen, G., et al. (2014). Nanoscale thermal transport. *Journal of Applied Physics*, 111(4), 043502. doi:10.1063/1.3634188
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- Klemens, P. G., & Pedraza, D. F. (2014). Thermal conductivity of polycrystalline graphites. *Carbon*, 32(4), 735-743. doi:10.1016/0008-6223(94)90182-1
- Kutz, M. (Ed.). (2015). *Mechanical Engineers' Handbook: Materials and Mechanical Design* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Lindsay, L., & Broido, D. A. (2013). Theory of thermal transport in multilayer materials. *Physical Review B*, 87(16), 165201. doi:10.1103/PhysRevB.87.165201
- Liu, X., Xu, L., & Zhang, G. (2017). Phonon thermal transport in low-dimensional materials. *Nano Research*, 10(9), 3008-3038. doi:10.1007/s12274-017-1506-x
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education.
- Pop, E., Sinha, S., & Goodson, K. E. (2010). Heat generation and transport in nanometer-scale transistors. *Proceedings of the IEEE*, 94(8), 1587-1601. doi:10.1109/JPROC.2006.879794

- Pop, E., Varshney, V., & Roy, A. K. (2017). Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications. *MRS Bulletin*, 37(12), 1273-1281.
- Reed, R. C. (2006). *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press.
- Rogers, D. F., Kreith, F., & Boehm, R. F. (2018). *Principles of Sustainable Energy Systems*. CRC Press.
- Tinkham, M. (2014). *Introduction to Superconductivity* (2nd ed.). Dover Publications.
- Totten, G. E. (2018). *Handbook of Hydraulic Fluid Technology* (2nd ed.). CRC Press.
- Broido, D. A., Malorny, M., Birner, G., Mingo, N., & Stewart, D. A. (2013). Intrinsic lattice thermal conductivity of semiconductors from first principles. *Applied Physics Letters*, 103(11), 111904. doi:10.1063/1.4820125
- Cahill, D. G., Braun, P. V., Chen, G., et al. (2014). Nanoscale thermal transport. *Journal of Applied Physics*, 111(4), 043502. doi:10.1063/1.3634188
- Li, W., Carrete, J., & Mingo, N. (2018). Thermal conductivity of materials with complex atomic structures. *Applied Physics Reviews*, 5(4), 041101. doi:10.1063/1.5049645
- Lindsay, L. (2018). Phonon thermal conductivity in bulk materials and nanostructures. *Journal of Applied Physics*, 124(16), 161103. doi:10.1063/1.5046962
- Mahanti, S. D. (2020). Recent developments in lattice thermal conductivity. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 32(37), 373001. doi:10.1088/1361-648X/ab9455
- Minnich, A. J. (2015). Advances in phonon engineering. *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 19(3), 183–209. doi:10.1080/15567265.2015.1042914
- Pop, E. (2010). Energy dissipation and transport in nanoscale devices. *Nano Research*, 3(3), 147–169. doi:10.1007/s12274-010-1035-3
- Rhim, Y.-M., & Rogers, J. A. (2016). Thermal properties of materials for stretchable and flexible electronics. *Advanced Materials*, 28(13), 2659–2664. doi:10.1002/adma.201504953

- Snyder, G. J., & Toberer, E. S. (2011). Complex thermoelectric materials. *Nature Materials*, 7(2), 105-114. doi:10.1038/nmat2090
- Ziman, J. M. (2011). *Electrons and Phonons: The Theory of Transport Phenomena in Solids*. Oxford University Press.

BAB 5

GETARAN KRISTAL

Oleh Rahmaniah

5.1 Pendahuluan

Dalam fisika benda padat, getaran kristal adalah fenomena penting yang mempengaruhi berbagai sifat material, seperti sifat termal, optik, dan elektroniknya. Karena energi kinetik dan energi potensial antaratom, atom-atom dalam kisi kristal berosilasi di sekitar posisi kesetimbangannya pada tingkat atomik. Pola tertentu yang mencerminkan keteraturan struktur kristal menyebabkan osilasi ini terjadi.

Salah satu konsep yang paling umum digunakan dalam fisika untuk menjelaskan getaran kristal adalah fonon, yaitu kuantum getaran atom yang terdapat dalam kristal. Fonon menunjukkan getaran kolektif yang menyebar melalui kisi kristal sebagai gelombang elastis. Fonon juga memainkan peran penting dalam interaksi antara cahaya dan materi, serta dalam fenomena konduktivitas termal dan listrik (Sidebottom, 2012).

Kisi kristal menunjukkan pola atom atau molekul yang teratur dalam material padat kristal. Sistem massa-pegas memiliki gaya pemulih di mana setiap atom dalam kisi ini berinteraksi dengan tetangga terdekatnya. Karena prinsip ketidakpastian kuantum, gerakan translasi atom berhenti pada suhu nol absolut. Namun, atom masih mengalami getaran kecil di sekitar posisi kesetimbangannya (Ashcroft & Mermin, 1976).

Energi getaran terkuantisasi menjadi fonon, paket energi diskrit, menurut mekanika kuantum. Tergantung pada pola osilasi atom dalam kristal, fonon dapat berupa fonon akustik atau fonon optik. Fonon akustik terkait dengan penyebaran suara dan memiliki frekuensi rendah (Kittel, 2005).

Banyak sifat material dipengaruhi oleh getaran atomik. Interaksi fonon-elektron sangat penting untuk superkonduktivitas dan fenomena lainnya seperti efek Jahn-Teller pada skala

mikroskopis. Namun, pada skala makroskopis, getaran ini berdampak pada konduktivitas termal karena fonon bertanggung jawab atas transfer panas dalam banyak padatan (Sidebottom, 2012). Cacat dan batas butiran material juga dapat berdampak pada hamburan fonon dan penurunan konduktivitas termal.

5.2 Monatomik Basis

Setiap sel satuan kristal dengan basis monatomik memiliki satu atom. Ini menyediakan sistem yang ideal untuk mempelajari getaran dasar atomik padatan. Interaksi gaya antar atom, mirip dengan pegas linier, menyebabkan getaran atom-atom dalam kristal ini. Ketika atom menyimpang dari posisi kesetimbangannya, gaya pemulih menarik atom kembali, yang menyebabkan osilasi berulang yang mengirimkan gelombang melalui kisi. Persamaan gerak atom ke- n dalam sistem linier satu dimensi di mana atom berada pada jarak a satu sama lain dapat dirumuskan sebagai:

$$m \frac{d^2 u_n(t)}{dt^2} = k(u_{n+1}(t) + u_{n-1}(t) - 2u_n(t)) \quad (5.1)$$

Dengan ;

m = massa atom

k = konstanta pegas antar atom

$u_n(t)$ = Perpindahan atom n dari posisi keseimbangan pada waktu t

Solusi dari persamaan ini menghasilkan osilasi harmonik di mana amplitudo gelombang bergantung pada interaksi antar atom. Walaupun basis monatomik memberikan dasar yang sederhana, model ini tidak dapat menjelaskan sifat getaran kompleks seperti interaksi fonon dan elektron, yang lebih baik dipahami melalui sistem dengan atom berbeda atau sistem multiatomik (Ashcroft & Mermin, 1976). Hubungan dispersi dalam sistem ini menghubungkan frekuensi sudut ω dengan vektor gelombang k . Dalam satu dimensi, persamaan hubungan dispersi adalah:

$$\omega(k) = 2 \sqrt{\frac{k}{m}} \left| \sin\left(\frac{ka}{2}\right) \right| \quad (5.2)$$

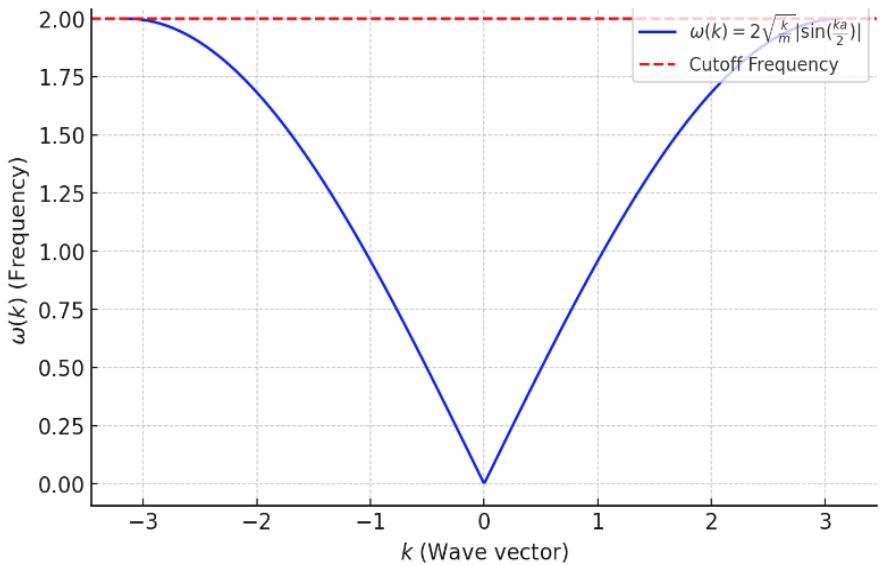
Dengan :

a = jarak antar atom

k = vector gelombang

Hubungan ini menunjukkan bahwa frekuensi memiliki titik tertinggi yang dikenal sebagai frekuensi cutoff. Gelombang dengan frekuensi lebih tinggi tidak dapat menyebar melalui kristal. Menurut Kittel (2005), fenomena ini sangat penting untuk memahami batas konduktivitas termal dan kapasitas kalor material pada suhu tinggi.

Berikut adalah grafik hubungan dispersi untuk rantai monatomik. Grafik ini memperlihatkan bahwa frekuensi sudut $\omega(k)$ mencapai batas maksimum, yang disebut frekuensi cutoff (ditunjukkan oleh garis putus-putus merah). Gelombang dengan frekuensi di atas batas ini tidak dapat merambat melalui kristal.



Gambar 5.1. Grafik hubungan dispersi untuk rantai monatomik
(Sumber : Ashcroft, 1976)

1. **Sumbu horizontal:** Menunjukkan vektor gelombang k dalam rentang $-\pi/a \leq k \leq \pi/a$, dengan a sebagai konstanta kisi.
2. **Sumbu vertikal:** Menampilkan frekuensi sudut $\omega(k)$ sebagai fungsi dari k .
3. **Frekuensi cutoff:** Batas maksimum frekuensi yang dapat merambat, setelah itu gelombang tidak dapat lagi menyebar melalui kristal.

5.2.1 Zona Brillouin

Zona Brillouin merupakan konsep kunci dalam fisika benda padat yang digunakan untuk menganalisis getaran kristal dan perilaku elektron dalam material. Zona ini menggambarkan wilayah dalam *reciprocal lattice* (ruang resiprokal) yang mencakup seluruh vektor gelombang unik yang relevan untuk menggambarkan gelombang dalam kristal. Konsep zona Brillouin memungkinkan penggambaran gelombang secara lebih terstruktur dengan menghindari representasi yang berlebihan atau berulang. Adapun langkah-langkah untuk membangun zona Brillouin pertama:

1. Pilih satu titik kisi dalam reciprocal lattice (biasanya titik asal).
2. Temukan tetangga terdekat dari titik tersebut.
3. Gambar bidang-bidang tegak lurus terhadap vektor yang menghubungkan titik asal dan tetangganya, dengan bidang melewati titik tengah dari vektor tersebut.
4. Ruang yang dibatasi oleh bidang-bidang ini disebut zona Brillouin pertama.

Contoh Zona Brillouin dalam Sistem 1D, 2D, dan 3D

1. **1D:** Pada sistem satu dimensi dengan jarak kisi a , zona Brillouin pertama memiliki batas:

$$\frac{-\pi}{a} \leq k \leq \frac{\pi}{a}$$

2. **2D:** Untuk kisi dua dimensi berbentuk persegi, zona Brillouin pertama berbentuk bujur sangkar dengan panjang sisi $\frac{2\pi}{a}$.
3. **3D:** Dalam tiga dimensi, bentuk zona Brillouin menjadi lebih kompleks, misalnya seperti heksagonal dalam kisi *hexagonal close-packed* (HCP) atau kubus dalam kisi *body-centered cubic* (BCC).

5.2.2 Boundary Conditions and Allowed Modes

Kondisi batas menentukan mode gelombang mana yang diizinkan dalam kristal. Dua kondisi batas yang umum digunakan adalah:

1. Kondisi batas tertutup: Perpindahan di ujung rantai adalah nol.

2. Kondisi batas periodik: Ujung rantai dihubungkan satu sama lain, membentuk sistem melingkar.

Untuk kondisi batas periodik dengan N atom, vektor gelombang k yang diizinkan adalah:

$$k = \frac{2\pi n}{Na} \text{ dengan } n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm\left(\frac{N}{2} - 1\right)$$

Ini mengarah pada diskretisasi mode getaran dalam kristal (Ashcroft & Mermin, 1976).

5.2.3 Phonons

Fonon adalah eksitasi kuantum yang muncul dari getaran atom dalam kristal, mirip dengan foton sebagai kuantum cahaya. Fonon dihasilkan dari pemodelan kristal sebagai massa yang terhubung oleh pegas yang menggambarkan gaya antar atom. Gelombang ini dapat direpresentasikan dengan fungsi sinusoidal, dan dalam bentuk kuantum, eksitasi ini disebut fonon.

Energi fonon dirumuskan sebagai:

$$E = n\hbar\omega \quad (5.3)$$

dengan:

n = jumlah fonon,

$\hbar$ = konstanta Planck tereduksi ($\hbar = \frac{h}{2\pi}$),

ω = frekuensi sudut getaran.

Fonon dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan pola osilasi atom:

1) Fonon Akustik

Fonon ini menggambarkan osilasi atom dalam fase yang sama, seperti gelombang suara yang menyebar melalui kristal. Pada fonon akustik, frekuensi berbanding lurus dengan vektor gelombang k :

$$\omega(k) \propto k$$

Fonon akustik memegang peran penting dalam konduktivitas termal karena menjadi medium utama transfer panas.

2) Fonon Optik

Fonon ini melibatkan atom dalam sel satuan yang berosilasi dengan arah berlawanan. Fonon optik memiliki

frekuensi lebih tinggi dan terlibat dalam interaksi dengan cahaya, seperti dalam spektroskopi inframerah dan Raman. Hubungan dispersi fonon optik biasanya dapat dinyatakan sebagai:

$$\omega(k) \approx \omega_0$$

Fonon memiliki kontribusi besar terhadap kapasitas kalor material. Pada suhu rendah, hanya sedikit fonon dengan energi rendah yang tereksitasi, sehingga kapasitas kalor menurun. Model Debye memberikan pendekatan untuk memprediksi kapasitas kalor sebagai fungsi suhu:

$$C_V = 9Nk_B \left(T/\theta_D \right)^3 \int_0^{\theta_D} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad (5.4)$$

dengan:

θ_D = suhu Debye,

N = jumlah atom dalam kristal,

k_B = konstanta Boltzmann.

Fonon juga mempengaruhi konduktivitas termal material. Transfer energi dalam bentuk panas disalurkan melalui fonon, dan konduktivitas termal dapat dinyatakan sebagai:

$$\kappa = \frac{1}{2} C_V v_s l \quad (5.5)$$

Dengan :

C_V = kapasitas kalor,

v_s = kecepatan suara dalam material,

l = panjang lintasan bebas rata-rata fonon.

Hamburan fonon oleh fonon lainnya, cacat kristal, atau batas butiran akan mengurangi konduktivitas termal material. Fonon dapat berinteraksi dengan elektron, memengaruhi sifat elektronik material. Dalam fenomena superkonduktivitas, interaksi antara fonon dan elektron menghasilkan pembentukan pasangan Cooper, memungkinkan aliran listrik tanpa resistansi. Fonon juga berinteraksi dengan cahaya. Spektroskopi inframerah dan Raman

memanfaatkan interaksi ini untuk mempelajari struktur kristal dan mode getaran atom.

5.3 Diatomic Basis

Pada sistem kristal dengan basis diatomik, setiap sel satuan berisi dua atom berbeda, baik dalam jenis maupun sifatnya. Hal ini membuat analisis lebih kompleks dibandingkan sistem monatomik dan menghasilkan mode getaran yang lebih beragam, seperti gelombang akustik dan optik, serta celah energi.

Pada batas panjang gelombang besar, di mana vektor gelombang k mendekati nol, osilasi kedua atom dalam sel satuan hampir seragam. Getaran ini menghasilkan gelombang akustik yang mirip dengan gelombang suara, dan hubungan antara frekuensi dan vektor gelombang bersifat linier. Mode akustik ini sangat berperan dalam konduktivitas termal, karena transfer energi dalam bentuk panas dilakukan melalui gelombang ini (Ashcroft & Mermin, 1976; Kittel, 2005).

Ketika panjang gelombang mendekati tepi zona Brillouin, gelombang mengalami difraksi dan pembentukan gelombang berdiri. Pada titik ini, terdapat batas frekuensi maksimum yang memisahkan mode akustik dan optik. Fenomena ini menghasilkan celah energi, yaitu perbedaan frekuensi antara kedua mode tersebut. Celah energi ini memengaruhi kemampuan material dalam mengonduksi listrik dan interaksi dengan cahaya (Kittel, 2005).

Dalam sistem diatomik, gelombang optik muncul ketika kedua atom dalam sel berosilasi dengan arah berlawanan. Gelombang ini relevan dalam aplikasi spektroskopi, karena interaksinya dengan radiasi elektromagnetik. Adanya celah energi antara gelombang akustik dan optik memberikan kendali atas sifat optik dan elektronik material, yang penting dalam pengembangan perangkat semikonduktor dan optoelektronik (Ashcroft & Mermin, 1976; Sidebottom, 2012).

5.3.1 Batas Panjang Gelombang Besar (*Long Wavelength Limit*)

Pada batas panjang gelombang besar, yaitu ketika vektor gelombang k mendekati nol, osilasi atom-atom dalam sel satuan terjadi hampir serentak dan dengan fase yang sama. Kondisi ini menghasilkan gelombang akustik, yaitu gelombang yang serupa dengan gelombang suara yang merambat melalui material. Mode ini berperan penting dalam menentukan sifat termal dan akustik material (Kittel, 2005).

Pada panjang gelombang yang besar ini, perbedaan massa dan interaksi antara kedua atom dalam sel satuan tidak begitu signifikan. Oleh karena itu, sistem dapat didekati dengan model sederhana seperti rantai monatomik. Hubungan antara frekuensi dan vektor gelombang untuk mode akustik dinyatakan sebagai:

$$\omega(k) \propto k$$

Fonon akustik dalam kondisi ini menjadi pengantar utama energi dalam bentuk panas, yang berperan besar dalam menentukan konduktivitas termal material. Pada suhu rendah, transfer panas sebagian besar disebabkan oleh propagasi fonon akustik (Ashcroft & Mermin, 1976).

Peran utama fonon akustik adalah dalam transfer panas energi. Pada panjang gelombang yang lebih besar, hamburan fonon terjadi dengan frekuensi yang lebih rendah saat terjadi di cacat kristal atau batas butiran, sehingga memfasilitasi transfer energi yang lebih optimal. Model Debye (persamaan 5.4) digunakan untuk menjelaskan bagaimana kapasitas kalor berubah bergantung pada suhu.

Meskipun atom-atom berosilasi hampir serentak pada batas panjang gelombang besar, massa kedua atom dalam basis diatomik tetap memengaruhi kecepatan penyebaran gelombang. Dalam mode akustik, kecepatan suara dalam material bergantung pada massa atom dan konstanta gaya antar atom:

$$v_s = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Semakin besar massa atom, semakin lambat kecepatan suara dalam material tersebut. Hal ini mempengaruhi bagaimana fonon merambat dan berkontribusi terhadap sifat mekanik dan termal kristal (Kittel, 2005).

5.3.2 Gelombang di Sekitar Zona Brillouin

Ketika gelombang mendekati tepi zona Brillouin, sifat dan propagasinya mengalami perubahan yang signifikan. Zona Brillouin membatasi ruang vektor gelombang di mana setiap gelombang unik terdefinisi dengan jelas. Saat mencapai tepi zona ini, gelombang akan mengalami difraksi Bragg, membentuk gelombang berdiri dan mengubah perilaku propagasinya. Fenomena ini sangat memengaruhi sifat optik dan elektronik material (Ashcroft & Mermin, 1976; Kittel, 2005).

Di dekat tepi zona Brillouin, frekuensi gelombang mencapai batas maksimal, dikenal sebagai frekuensi cutoff. Pada kondisi ini, hubungan antara frekuensi dan vektor gelombang mengikuti persamaan:

$$\omega^2(k) = \omega_0^2 + C \cdot k^2 \quad (5.6)$$

Dengan :

ω_0 = frekuensi sudut di pusat zona Brillouin,

C = konstanta material.

Persamaan 5.6 menunjukkan bahwa frekuensi mulai mendatar saat kkk mendekati batas zona Brillouin, menghasilkan celah energi. Celah energi ini memisahkan mode akustik dan optik, dan fenomena ini memainkan peran penting dalam interaksi antara elektron dan fonon dalam material (Ashcroft & Mermin, 1976).

Di tepi zona Brillouin, muncul perbedaan frekuensi antara mode akustik dan optik, yang menciptakan celah energi. Celah ini mengindikasikan rentang frekuensi di mana gelombang tidak dapat merambat melalui kristal. Fenomena ini serupa dengan konsep band gap dalam semikonduktor, di mana hanya energi tertentu yang dapat mengalir melalui material. Celah energi ini mempengaruhi perilaku optik dan elektronik material, dan relevan dalam

pengembangan semikonduktor dan perangkat optoelektronik (Kittel, 2005; Sidebottom, 2012).

Di dekat tepi zona Brillouin, hamburan fonon dengan cacat kristal dan batas butiran lebih sering terjadi, mengurangi efisiensi propagasi fonon. Hal ini berdampak pada konduktivitas termal material, karena energi panas tidak dapat lagi ditransfer secara efisien. Oleh karena itu, memahami perilaku gelombang di sekitar zona Brillouin sangat penting dalam desain material dengan konduktivitas termal yang dioptimalkan (Ashcroft & Mermin, 1976).

5.3.3 Gelombang Akustik, Gelombang Optik, dan Celah Energi

Pada sistem kristal dengan basis diatomik, dua jenis utama gelombang dapat terbentuk, yaitu gelombang akustik dan gelombang optik. Kedua jenis gelombang ini memiliki perbedaan mendasar dalam pola osilasi atom dan berperan penting dalam menentukan sifat termal, mekanik, serta optik material. Selain itu, interaksi antara kedua gelombang ini pada tepi zona Brillouin menghasilkan celah energi, yang penting untuk memahami sifat elektronik dan optik dari material (Ashcroft & Mermin, 1976; Kittel, 2005).

Gelombang akustik muncul ketika atom-atom dalam sel satuan berosilasi searah dengan fase yang sama. Gelombang ini menyerupai propagasi suara dan penting dalam transfer panas, karena energi panas di dalam kristal dibawa oleh fonon akustik. Hubungan antara frekuensi dan vektor gelombang untuk gelombang akustik bersifat linier di sekitar $k = 0$:

$$\omega(k) \propto k$$

Gelombang akustik memungkinkan energi panas berpindah melalui kristal secara efisien, terutama ketika hamburan fonon dengan cacat kristal atau batas butiran minimal. Namun, ketika hamburan meningkat, efisiensi konduktivitas termal material akan menurun (Sidebottom, 2012).

Gelombang optik terbentuk ketika dua atom dalam sel satuan berosilasi dengan arah berlawanan. Mode ini memiliki frekuensi yang lebih tinggi daripada gelombang akustik dan relevan dalam interaksi dengan cahaya. Gelombang optik

berperan penting dalam spektroskopi inframerah dan Raman, di mana gelombang ini memunculkan spektrum khas yang mencerminkan struktur kristal material.

Dalam beberapa kasus, gelombang optik berinteraksi dengan foton untuk membentuk polaritons, yaitu kuantum gabungan antara fonon dan foton. Polaritons ini digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi, seperti laser dan sensor optik (Kittel, 2005).

Di tepi zona Brillouin, terdapat perbedaan frekuensi antara mode akustik dan optik, menghasilkan celah energi. Celah ini merupakan rentang frekuensi di mana gelombang tidak dapat merambat melalui material. Fenomena celah energi ini serupa dengan band gap dalam semikonduktor, di mana hanya elektron dengan energi tertentu yang dapat berpindah dari pita valensi ke pita konduksi.

Keberadaan celah energi sangat mempengaruhi sifat optik dan elektronik material. Dalam material semikonduktor, celah energi menentukan seberapa mudah arus listrik dapat mengalir, sementara dalam perangkat optoelektronik, celah ini berperan dalam menyerap atau memancarkan cahaya dengan efisiensi tinggi (Ashcroft & Mermin, 1976).

Pemahaman tentang gelombang akustik, gelombang optik, dan celah energi sangat penting dalam pengembangan berbagai perangkat teknologi modern, seperti:

1. **Semikonduktor:** Celah energi menentukan energi minimum untuk eksitasi elektron, yang relevan dalam pengembangan komponen elektronik seperti dioda dan transistor.
2. **Perangkat Optik:** Gelombang optik digunakan dalam spektroskopi untuk mempelajari struktur kristal dan sifat getarannya.
3. **Material Termoelektrik:** Gelombang akustik memainkan peran penting dalam transfer panas, dan dengan mengontrol hamburan fonon, efisiensi perangkat termoelektrik dapat ditingkatkan.

- 4. Laser dan Sensor:** Polaritons dari interaksi gelombang optik dan cahaya digunakan untuk mengembangkan sensor dan laser berperforma tinggi.

5.4 Hamburan dari Fonon (*Scattering from Phonons*)

Hamburan fonon merupakan fenomena penting dalam fisika benda padat, yang berperan dalam berbagai sifat material, seperti konduktivitas termal dan interaksi dengan sinar-X, neutron, atau foton. Ketika gelombang atau partikel berinteraksi dengan fonon dalam kristal, terjadi perubahan arah dan, dalam beberapa kasus, perubahan energi. Hamburan ini dibagi menjadi dua jenis utama: hamburan elastis (Bragg) dan hamburan tidak elastis, di mana masing-masing memberikan wawasan penting tentang struktur dan sifat dinamis material (Ashcroft & Mermin, 1976; Kittel, 2005).

Hamburan elastis terjadi ketika gelombang (seperti sinar-X atau neutron) dipantulkan oleh atom dalam kristal tanpa adanya perubahan energi. Difraksi Bragg terjadi ketika gelombang yang datang dipantulkan dengan pola konstruktif oleh bidang atomik dalam kristal, menghasilkan interferensi yang memperkuat intensitas gelombang. Kondisi untuk difraksi Bragg mengikuti persamaan:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (5.7)$$

Dengan :

n = urutan difraksi,

λ = panjang gelombang,

d = jarak antar bidang kristal,

θ = sudut datang radiasi.

Difraksi Bragg memberikan informasi tentang jarak antar atom dan orientasi kristal, yang sangat berguna dalam analisis struktur material.

Faktor Debye–Waller menggambarkan bagaimana getaran atom mempengaruhi intensitas hamburan. Ketika suhu material meningkat, atom-atom bergetar lebih kuat, menyebabkan lebih banyak hamburan inkoheren dan mengurangi intensitas difraksi. Persamaan faktor Debye–Waller dinyatakan sebagai:

$$I = I_0 e^{-2W} \quad (5.8)$$

Dengan :

I = intensitas hamburan terukur,

I_0 = intensitas ideal tanpa getaran,

W = faktor Debye–Waller, yang bergantung pada frekuensi getaran dan suhu material.

Pada suhu tinggi, amplitudo getaran atom lebih besar, sehingga mengurangi intensitas difraksi konstruktif (Ashcroft & Mermin, 1976).

Hamburan tidak elastis terjadi ketika energi gelombang atau partikel yang datang berubah akibat interaksi dengan fonon. Dalam proses ini, energi gelombang bisa bertambah atau berkurang, tergantung pada apakah fonon baru diciptakan atau fonon yang ada diserap. Persamaan energi untuk hamburan ini adalah:

$$\Delta E = \hbar\omega$$

Dengan :

$\hbar$ = konstanta Planck tereduksi,

ω = adalah frekuensi fonon.

Hamburan tidak elastis sangat relevan dalam spektroskopi neutron dan Raman, di mana teknik ini digunakan untuk mengukur energi dan mode getaran dalam kristal. Jenis Hamburan Tidak Elastis:

1. **Hamburan Stokastik:** Energi gelombang berkurang karena menghasilkan fonon baru. Proses ini menyebabkan pergeseran frekuensi gelombang ke nilai lebih rendah.
2. **Hamburan Anti-Stokastik:** Energi gelombang meningkat karena menyerap fonon yang ada, menghasilkan pergeseran frekuensi ke arah lebih tinggi.

Hamburan tidak elastis sangat penting dalam pengembangan perangkat optoelektronik dan teknologi laser, karena interaksi energi antara fonon dan foton berperan dalam meningkatkan kinerja perangkat (Kittel, 2005). Hamburan fonon memainkan peran penting dalam berbagai aplikasi teknologi dan riset, antara lain:

1. **Difraksi Sinar-X dan Neutron:** Difraksi sinar-X digunakan untuk mempelajari struktur kristal, sedangkan hamburan neutron memberikan informasi tentang interaksi dinamis dalam material.
2. **Spektroskopi Raman:** Teknik ini memanfaatkan hamburan tidak elastis untuk mengidentifikasi mode getaran dan memperoleh informasi struktural tentang material.
3. **Konduktivitas Termal:** Hamburan fonon berperan dalam pengendalian aliran panas, yang relevan dalam pengembangan material termoelektrik dengan efisiensi tinggi.
4. **Desain Semikonduktor:** Hamburan tidak elastis mempengaruhi mobilitas elektron, yang sangat penting dalam desain perangkat semikonduktor seperti transistor dan dioda.

DAFTAR PUSTAKA

- Ashcroft, N.W. & Mermin, N.D., 1976. *Solid State Physics*. Holt, Rinehart, and Winston.
- Kittel, C., 2005. *Introduction to Solid State Physics*. 8th ed. New York: John Wiley & Sons.
- Sidebottom, D.L., 2012. *Fundamentals of Condensed Matter and Crystalline Physics: An Introduction for Students of Physics and Materials Science*. Cambridge University Press.

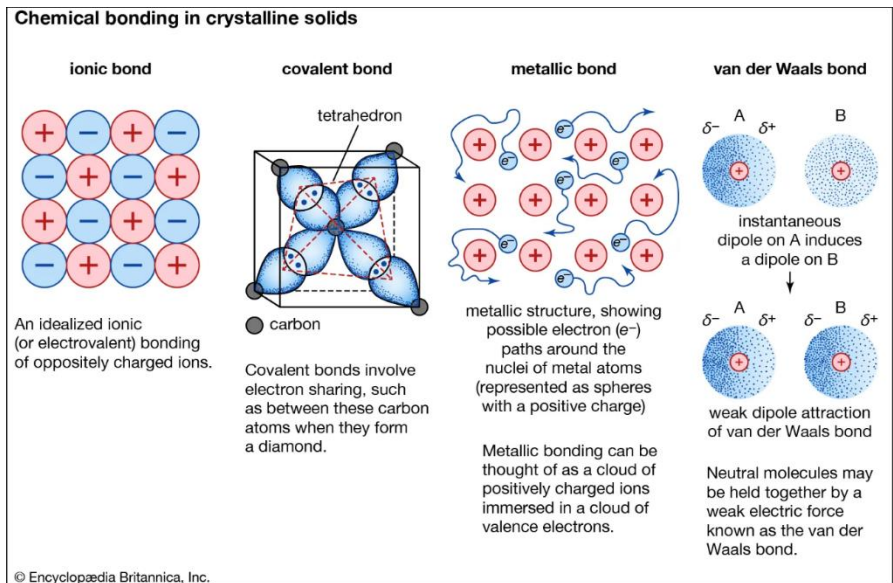
BAB 6

TEORI ELEKTRON BEBAS

Oleh Jannes Bastian Selly

6.1 Pendahuluan

Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan mengenai ikatan kimia yang membentuk struktur kristal suatu zat padat. Informasi mengenai jenis ikatan kimia dan struktur kristal ini kemudian dapat digunakan untuk menentukan berbagai sifat fisis sebuah material, seperti panas jenis. Namun penentuan panas jenis pada material logam, sedikit berbeda dengan material non-logam lainnya, karena ikatan logam pada struktur material logam berbeda dengan ikatan kimia pada material non-logam lainnya (Hamid 2021; Subaer, Zharvan & Irfanita 2022; Ngara 2023). Beberapa jenis ikatan kimia pada kristal zat padat dapat dilihat pada Gambar 6.1 berikut:



Gambar 6.1. Ikatan kimia pada kristal padat (sumber: McGrayne & Trefil, 2024)

Berdasarkan Gambar 6.1 di atas, terlihat bahwa pada material logam, struktur ikatan logam terdiri atas atom bermuatan positif atau ion positif dan elektron bebas yang bergerak secara acak disekitar ion positif tersebut. Kondisi ini menyebabkan penentuan panas jenis pada material logam perlu disesuaikan dengan mempertimbangkan keberadaan elektron bebas dalam stuktur material logam (Ngara 2023).

Teori elektron bebas pada material logam telah dilakukan melalui pemodelan oleh Drude-Lorentz sekitar tahun 1900 yang dikenal dengan Teori Gas Elektron bebas. Teori ini kemudian dikembangkan menjadi pemodelan elektron bebas terkuantisasi oleh Sommerfeld tahun 1928, untuk penentuan panas jenis material logam yang lebih akurat (Hamid 2021; Subaer et al. 2022; Ngara 2023). Materi ini akan dipelajari pada BAB selanjutnya mengenai Teori Elektron pada Logam. Pada BAB ini, secara khusus akan menjelaskan secara rinci mengenai teori terbentuknya elektron bebas dan ion positif dalam unsur logam. Namun sebelumnya perlu diketahui dahulu mengenai atom dan struktur atom, sebagai dasar pengetahuan sebelum mengkaji lebih jauh mengenai pembentukan ion positif dan elektron bebas.

6.2 Struktur Atom

Setiap materi yang ada di alam semesta, baik dalam fase padat, cair maupun gas, tersusun atas unit penyusun terkecil yaitu atom. Atom merupakan unit terkecil penyusun sebuah unsur yang masih mempertahankan sifat-sifat kimiawi unsur tersebut. Hal ini perlu ditegaskan karena berdasarkan ukuran, sebenarnya terdapat partikel sub-atom yang jauh lebih kecil sebagai penyusun sebuah atom. Akan tetapi partikel sub-atom penyusun atom ini tidak membawa sifat kimiawi suatu unsur, melainkan hanya jenis muatan tertentu. Sifat kimiawi unsur yang dimaksud merupakan sifat natural yang dibawa sebuah atom yang menyusun unsur tertentu yang membedakan dengan unsur lainnya (Chang 2003).

6.2.1 Partikel Penyusun Atom

Sebuah atom disusun oleh partikel sub-atom dengan jumlah dan komposisi tertentu. Terdapat tiga partikel sub-atom yang

menyusun sebuah atom, yaitu proton, elektron, dan neutron. Proton dan neutron merupakan partikel sub-atom yang saling berinteraksi membentuk inti atom, sedangkan elektron merupakan partikel sub-atom yang mengorbit inti pada jarak tertentu. Proton, neutron, dan elektron memiliki karakteristik yang berbeda (Chang 2003).

Ditinjau dari muatan yang dimiliki, proton merupakan partikel sub-atom yang bermuatan positif, sebaliknya elektron memiliki muatan negatif. Sedangkan partikel neutron merupakan partikel yang tidak bermuatan. Besarnya muatan yang dibawa oleh 1 partikel proton sama dengan 1 partikel elektron yaitu $1,6 \times 10^{-16} C$, yang membedakan adalah jenis muatannya. Dengan demikian, apabila dalam sebuah atom, jumlah proton dan elektron penyusun sama, maka muatan atom adalah nol (Chang 2003; Wiyatmo 2008).

Ditinjau dari massa partikel sub-atom, proton dan neutron memiliki massa yang hampir sama. Massa proton (m_p) = $1,673 \times 10^{-24} gram$, tidak jauh berbeda dengan massa neutron, (m_n) = $1,675 \times 10^{-24} gram$, sedangkan elektron memiliki massa jauh lebih kecil dibandingkan proton dan neutron yaitu (m_e) = $9,11 \times 10^{-28} gram$. Karena proton dan neutron saling berikatan membentuk inti atom, sedangkan elektron terpisah dan hanya mengorbit inti atom pada lintasan tertentu, maka massa total sebuah atom hampir seluruhnya dikatakan berada pada inti atom. Sedangkan elektron hanya memberikan kontribusi massa atom sangat kecil (Chang 2003; Wiyatmo 2008). Tabel 6.1 di bawah, memberikan rangkuman informasi terkait perbandingan karakteristik proton, neutron dan elektron sebagai partikel penyusun atom.

Tabel 6.1. Karakteristik partikel sub-atom

Jenis Partikel	Lambang	Massa (gram)	Muatan (coulomb)
Proton	p^+	$1,673 \times 10^{-24}$	$1,6 \times 10^{-16}$
Neutron	n^0	$1,675 \times 10^{-24}$	0
Elektron	e^-	$9,11 \times 10^{-28}$	$-1,6 \times 10^{-16}$

6.2.2 Inti Atom

Inti atom (nukleus) merupakan pusat dari struktur sebuah atom. Ukuran inti jauh lebih kecil dibandingkan keseluruhan atom, akan tetapi massa total sebuah atom hampir seluruhnya terpusat pada inti atom. Interaksi antara proton dan neutron, menghasilkan energi ikat inti yang dapat dihitung dengan persamaan (6.1) berikut

$$E_{ikat} = \Delta m \cdot 931,5 \text{ MeV} \quad (6.1)$$

Dimana E_{ikat} merupakan energi ikat inti atom yang hendak dihitung, Δm merupakan perbedaan massa atau defek massa antara jumlah massa proton dan neutron sebagai penyusun inti, dengan massa inti atom yang terukur. Jumlah massa proton dan neutron selalu lebih besar dibandingkan dengan massa inti atom yang terukur. Selisih massa atau defek massa inilah yang menjadi energi ikat inti setelah dikalikan dengan nilai energi dari satuan massa atom yaitu 931,5 MeV (Wiyatmo 2008).

Perhitungan selisih massa atau defek massa dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (6.2) berikut

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{inti} \quad (6.2)$$

Dimana, Δm adalah defek massa, Z adalah jumlah proton, m_p adalah massa proton, $(A - Z)$ adalah jumlah neutron, m_n adalah massa neutron, dan m_{inti} adalah massa inti atom. Energi ikat inti atom, merupakan energi yang dimiliki sebuah atom untuk mempertahankan ikatan pada inti, dengan kata lain untuk memisahkan atau menghancurkan inti atom dapat dilakukan dengan memberikan energi eksternal yang nilainya lebih besar dari energi ikat inti. Selain energi ikat inti, pada lintasan orbit elektron juga terdapat energi yang mempertahankan elektron tetap pada lintasan orbit dalam mengelilingi inti atom (Chang 2003; Wiyatmo 2008).

6.2.3 Lintasan Orbit Elektron

Elektron merupakan partikel sub-atom yang bergerak mengorbit inti atom. Lintasan orbit elektron terhadap inti atom dikenal sebagai kulit atom. Kulit atom terdiri dari beberapa lapisan dengan tingkat energi tertentu. Makin dekat kulit ke inti atom, tingkat energinya semakin besar. Energi pada kulit inilah yang

mengikat elektron sehingga tetap mengorbit inti atom pada lintasan tersebut (Chang 2003).

Kulit atom yang jaraknya lebih dekat ke inti atom disimbolkan dengan huruf *K*, dan memiliki tingkat energi yang lebih tinggi. Selanjutnya semakin keluar secara berurutan kulit atom di simbolkan dengan huruf *L* dan seterusnya. Secara sederhana, energi ikat pada setiap kulit atom, dapat dihitung dengan persamaan 6.3 berikut.

$$E_n = -\frac{13,6 \text{ eV}}{n^2} \quad (6.3)$$

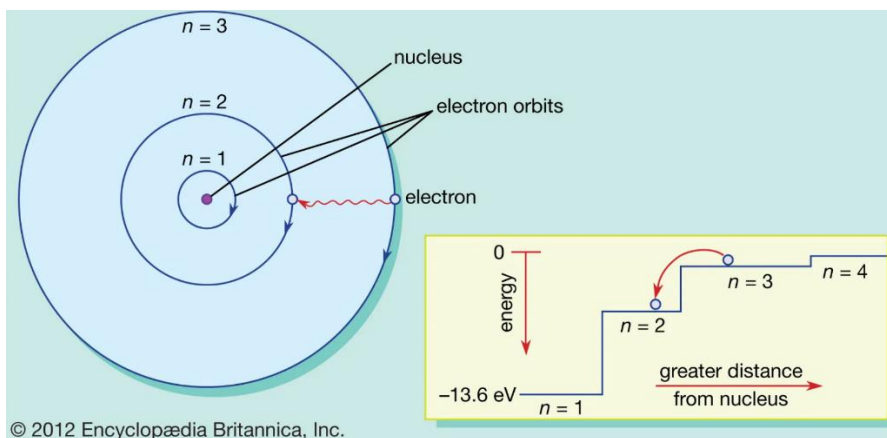
E_n merupakan energi ikat pada tingkat energi ke- n (kulit ke- n). kulit *K* sebagai kulit terdalam yang paling dekat dengan inti atom memiliki $n=1$. Kulit *L* memiliki $n=2$, dan seterusnya. Nilai $-13,6 \text{ eV}$, merupakan energi ikat elektron pada tingkat energi pertama ($n=1$) atau pada kulit *K*, disebut juga sebagai energi dasar Bohr (Wiyatmo 2008). Tanda negatif menunjukkan bahwa elektron terikat pada inti, dimana energi lebih rendah dibandingkan dengan keadaan bebas.

Pada kulit kedua, kulit *L* ($n=2$), energi kulit dapat dihitung menggunakan persamaan (6.3) sebagai berikut

$$\begin{aligned} E_n &= -\frac{13,6 \text{ eV}}{n^2} \\ E_n &= -\frac{13,6 \text{ eV}}{2^2} \\ E_n &= -\frac{13,6 \text{ eV}}{4} = -3,4 \text{ eV} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa energi pada kulit kedua, kulit *L*, atom hidrogen adalah $-3,4 \text{ eV}$. Terdapat selisih energi $10,2 \text{ eV}$ dengan energi pada kulit pertama, kulit *K*.

Persamaan (6.3) di atas hanya berlaku untuk atom hidrogen, sedangkan untuk atom selain hidrogen, perhitungan energi ikat elektron menjadi lebih kompleks karena adanya pengaruh jumlah proton yang lebih banyak pada inti dan interaksi antar elektron. Gambar 6.2 di bawah memberikan informasi visual mengenai lintasan orbit elektron dan tingkat energinya



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Gambar 6.2. Lintasan orbit elektron dan tingkat energi masing-masing lintasan (sumber: McGrayne & Trefil 2024)

Jumlah maksimum elektron pada setiap kulit, juga dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan $2n^2$. Sebagai contoh jumlah maksimum elektron pada kulit *K* yang memiliki tingkat energi pertama ($n=1$) adalah 2. Selanjutnya pada kulit *L* ($n=2$) jumlah maksimum elektron adalah 8, dan seterusnya. Elektron pada kulit terluar sebuah atom disebut sebagai elektron valensi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa elektron valensi memiliki energi ikat paling lemah sehingga rentan untuk terlepas dari atom ketika diberikan energi luar yang sama atau lebih besar dari energi ikat (Wiyatmo 2008).

Berdasarkan penjelasan di atas, dapat disimpulkan bahwa energi ikat inti jauh lebih besar dibandingkan energi ikat pada kulit. Dengan kata lain peluang sebuah elektron dibebaskan dari atom jauh lebih besar dibandingkan dengan proton atau neutron.

Sebuah atom pada dasarnya memiliki jumlah proton dan elektron yang sama, sehingga atom tidak bermuatan atau netral. Akan tetapi ketika atom menerima energi luar yang cukup untuk melepaskan elektron valensi dari atom, maka atom yang semula netral, akan berubah menjadi bermuatan positif sehingga disebut sebagai ion positif. Hal ini terjadi karena perbandingan jumlah proton dan elektron yang tidak lagi sama, yaitu lebih banyak jumlah proton sehingga atom berubah menjadi ion positif. Sedangkan elektron yang terlepas dari atom menjadi elektron bebas.

Keberadaan ion positif dan elektron bebas inilah yang kemudian digunakan untuk pemodelan dalam menjelaskan panas jenis zat dalam ikatan logam. Sebaliknya ketika atom mendapatkan tambahan elektron dari luar, maka atom akan berubah menjadi ion negatif karena jumlah elektron pada atom lebih banyak dibandingkan proton (Chang 2003).

6.2.4 Konfigurasi Elektron

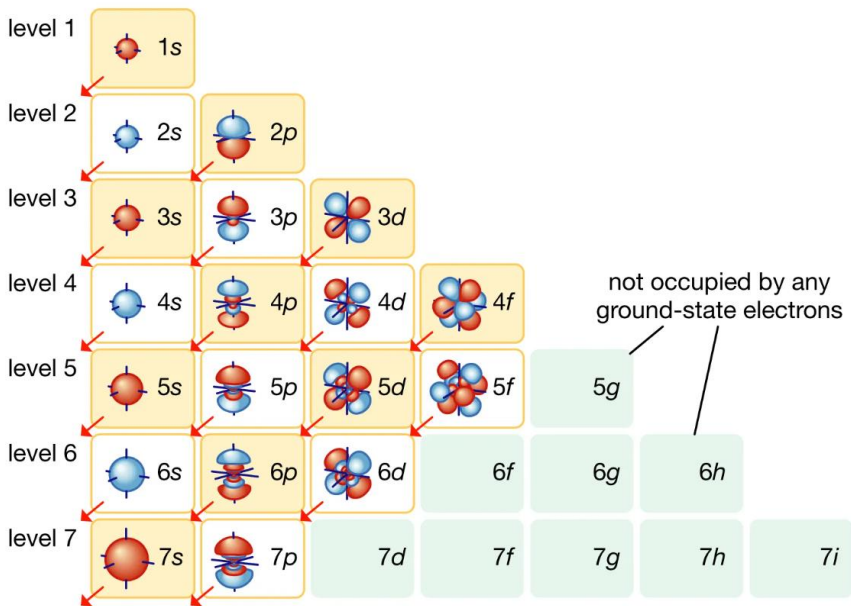
Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan tentang lintasan orbit elektron dan tingkat energinya. Namun keberadaan elektron dalam lintasan orbit ditentukan menurut tinjauan mekanika kuantum yang lebih kompleks. Penentuan posisi elektron-elektron dalam sebuah atom menurut orbit yang ditempati disebut konfigurasi elektron.

Berdasarkan model atom bohr, konfigurasi elektron dilakukan berdasarkan kulit. Penempatan elektron dimulai dari kulit K, dilanjutkan kulit L, dan seterusnya. Sedangkan menurut aturan Aufbau dan aturan Hund, konfigurasi elektron dimulai dari sub-kulit yang memiliki tingkat energi terendah diikuti dengan sub-kulit pada tingkat energi tinggi(Wiyatmo 2008). Pada setiap sub kulit juga memiliki batasan jumlah maksimum elektron, seperti dijelaskan pada Tabel 6.2 berikut

Tabel 6.2. Jumlah maksimum elektron pada sub kulit

Jenis sub-kulit	Jumlah Orbital	Jumlah elektron maksimum
Sub-kulit s	1	2
Sub-kulit p	3	6
Sub-kulit d	5	10
Sub-kulit f	7	14

Pengisian elektron dimulai dari tingkat energi paling rendah sebagaimana yang ditunjukkan melalui diagram pada Gambar 6.3 di bawah ini.



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Gambar 6.3. Skema pengisian eletron pada sub-kulit berdasarkan tingkat energi (Sumber:McGrayne & Trefil 2024)

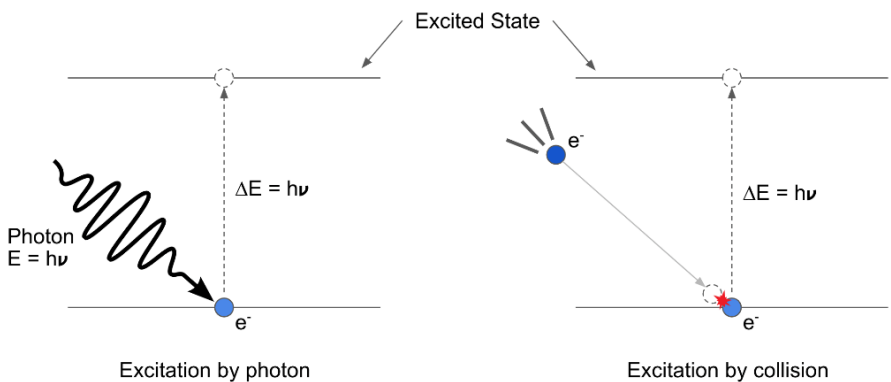
Berdasarkan Gambar 6.3 di atas, diketahui bahwa pengisian elektron pada sub-kulit dimulai dari tingkat energi pada sub kulit 1s, kemudian sub kulit 2s, 2p, 3s, dan seterusnya sesuai tanda panah (Chang 2003; McGrayne & Trefil 2024).

Elektron mengorbit inti atom sesuai dengan tingkat energi yang dimiliki. Akan tetapi dalam kondisi tertentu atom bisa saja menyerap energi eksternal sehingga berpengaruh terhadap posisi elektron. Ketika elektron menerima (menyerap) energi luar yang sesuai, maka elektron dapat mengalami proses eksitasi(Wiyatmo 2008).

6.2.5 Eksitasi Elektron

Eksitasi, merupakan suatu kondisi dimana terjadi penambahan sejumlah energi diskrit (energi eksitasi) ke suatu sistem, sehingga menyebabkan terjadi perubahan, dari kondisi energi terendah (keadaan dasar) ke kondisi energi yang lebih tinggi. Jika ditinjau pada elektron dalam kondisi dasar, ketika elektron

menyerap energi luar yang cukup maka elektron akan berpindah dari keadaan dasar ke tingkat energi yang lebih tinggi. Keadaan ini disebut eksitasi elektron. Sebaliknya ketika elektron berpindah kembali ke kondisi awal (tingkat energi dasar) maka elektron dikatakan mengalami deeksitasi (Wiyatmo 2008). Untuk lebih jelas, informasi mengenai proses eksitasi dan deeksitasi elektron dijelaskan secara visual melalui Gambar 6.4 berikut.



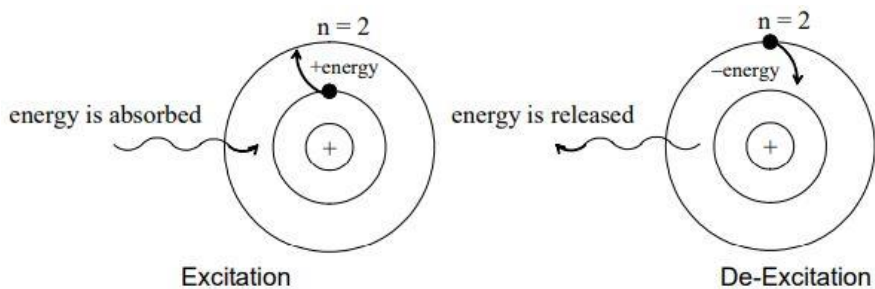
Gambar 6.4. Skema proses eksitasi elektron akibat penyerapan energi foton (a) atau melalui tumbukan dengan partikel lain (b)

(sumber : lanetphysicsguy - Own work, CC BY-SA 4.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=126423006>)

Transisi elektron ke keadaan tereksitasi dapat terjadi ketika elektron harus menyerap sejumlah energi (E) yang setara dengan perbedaan energi (ΔE) antara tingkat energi elektron saat ini dan tingkat energi yang lebih tinggi yang tidak terisi. Hal ini berarti bahwa energi foton diserap oleh elektron besarnya harus sama dengan perbedaan energi antar orbital (orbital awal elektron dengan orbital yang akan dituju). Sebagai contoh, energi dasar pada kulit K, atom hidrogen adalah $-13,6 \text{ eV}$, sedangkan energi pada kulit kedua, kulit L, adalah sebesar $-3,4 \text{ eV}$, maka perbedaan energi antar kulit K dan L, $\Delta E = -3,4 \text{ eV} - (-13,6 \text{ eV}) = 10,2 \text{ eV}$. Artinya bahwa elektron pada kulit pertama atom hidrogen, dapat mengalami eksitasi ke kulit kedua, jika menyerap energi dari luar sebesar $10,2 \text{ eV}$.

Sesuai dengan aturan dasar konfigurasi elektron, bahwa pengisian elektron dimulai dari tingkat energi paling rendah, maka ketika elektron tereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi, posisi elektron awal mengalami kekosongan, sehingga elektron akan bertransisi ke keadaan dasar dengan melepaskan energi dalam jumlah tertentu yang sama dengan perbedaan energi antar orbital. Kondisi ini disebut deeksitasi. Perbandingan kondisi eksitasi dan deeksitasi elektron dijelaskan secara visual melalui Gambar 6.5 berikut



Gambar 6.5. Skema perbedaan kondisi eksitasi dan deeksitasi elektron

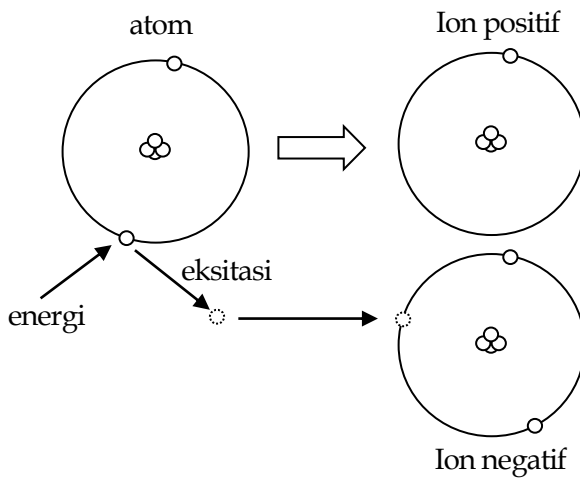
Semakin jauh letak orbit elektron dari inti atom, semakin mudah elektron mengalami eksitasi, karena energi kulit yang makin lemah sering bertambah besar jari-jari kulit atom. Dengan demikian maka pada atom yang partikel sub-atomnya dalam jumlah besar, pada elektron valensi (elektron terluarnya), memiliki energi yang sangat kecil sehingga mudah mengalami eksitasi dan keluar dari atom. Hal inilah yang menyebabkan atom mengalami ionisasi dan berubah menjadi atom yang bermuatan positif atau dikenal sebagai ion positif. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada bagian pendahuluan BAB ini, ikatan pada kristal logam dimodelkan sebagai ion positif yang diselubungi oleh elektron bebas yang merupakan elektron valensi dari atom logam yang mengalami eksitasi hingga keluar dari atom. Proses berubahnya atom menjadi bermuatan positif akibat tereksitasinya elektron valensi keluar dari atom disebut sebagai ionisasi. Pada bagian selanjutnya akan dijelaskan mengenai proses ionisasi pada atom.

6.3 Ionisasi Atom atau Molekul

Ionisasi merupakan proses perubahan atom atau molekul yang awalnya tidak bermuatan, menjadi bermuatan karena kehilangan elektron atau penambahan elektron pada atom atau molekul. Ion positif terbentuk ketika atom atau molekul kehilangan elektron akibat adanya energi luar yang diserap oleh atom, atau tumbukan dengan atom atau molekul lain (Wiyatmo 2008).

Serapan energi atau tumbukan dapat menghasilkan tambahan energi yang apabila sesuai dengan selisih energi ikat elektron, maka dapat melepaskan elektron dari atom sehingga atom berubah menjadi ion positif. Sebaliknya, elektron bebas dapat berinteraksi dengan atom atau molekul lain sehingga mengubah atom atau molekul tersebut menjadi ion negatif (Chang 2003). Gambar 6.6 menjelaskan secara visual skema proses ionisasi

Gambar 6.6 menjelaskan bahwa ketika atom atau molekul menyerap energi dari luar dengan jumlah yang sesuai dengan energi dasar kulit tempat elektron melakukan orbit, maka elektron akan mengalami eksitasi, sehingga atom atau molekul yang semula tidak bermuatan, karena kehilangan elektron maka berubah menjadi bermuatan positif, atau ion positif. Sebaliknya elektron bebas yang telah keluar dari atom atau molekul dapat berikatan dengan atom atau molekul lain, sehingga atom atau molekul lain tersebut berubah menjadi bermuatan negatif (Chang 2003; Wiyatmo 2008).



Gambar 6.6. Skema perubahan atom menjadi ion positif atau negatif saat kehilangan atau menerima elektron.

Ikatan logam merupakan jenis ikatan antara atom-atom logam. Karena memiliki partikel sub-atom yang banyak, dan ikatannya yang rapat, maka elektron valensi pada atom logam yang membentuk ikatan logam mudah tereksitasi dan membentuk ikatan antara ion positif dengan elektron bebas yang terdelokalisasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.1. Hal ini menyebabkan ikatan logam memiliki sifat fisis yang unik. Untuk mempelajari sifat ikatan logam, dilakukan pemodelan elektron pada logam oleh Drude-Lorentz, dan dikembangkan menjadi pemodelan elektron bebas terkuantisasi oleh Sommerfeld tahun 1928, untuk penentuan panas jenis material logam (Hamid 2021; Subaer et al. 2022; Ngara 2023). Topik ini akan dijelaskan secara rinci pada BAB selanjutnya mengenai elektron bebas dalam logam.

DAFTAR PUSTAKA

- Chang, R., 2003, 'Atom, Molekul, dan Ion', *Kimia Dasar, Jilid 1 Edisi Ketiga*, 3rd edn., vol. 1, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Hamid, A., 2021, *Pendahuluan Fisika Zat Padat*, Syiah Kuala University Press, Banda Aceh.
- McGrayne, S.Bertsch. & Trefil, J., 2024, *Atom, Encyclopaedia Britannica*.
- Ngara, Z.S., 2023, *Fisika Zat Padat*, Penerbit NEM, Pekalongan, Jawa Tengah.
- Subaer, Zharvan, V. & Irfanita, R., 2022, *Fisika Zat Padat*, Jilid 1, Jariah Publishing Intermedia, Gowa.
- Wiyatmo, Yusman., 2008, *Fisika Atom - Dalam perspektif Klasik, Semiklasik dan Kuantum*, Pustaka Pelajar, Yogyakarta.

BAB 7

TEORI ELEKTRON DALAM LOGAM

Oleh Fetronela Rambu Bobu

7.1 Pendahuluan

Pada bab sebelumnya telah dibahas terkait teori elektron bebas. Seperti halnya pada non logam, secara umum, teori elektron dalam logam menjelaskan bahwa elektron bebas yang dimiliki oleh logam bergerak melalui kisi atom sehingga menyebabkan logam dapat menghantarkan arus listrik dan panas dengan baik.

Bab ini akan membahas terkait teori elektron bebas dalam logam. Dimulai dari teori yang dikembangkan oleh Drude (1900) kemudian disempurnakan oleh Sommerfeld (1928).

7.2 Teori Elektron dalam Logam

Teori elektron bebas dalam logam merupakan model yang menggambarkan sifat-sifat konduktivitas logam dengan menganggap elektron valensi sebagai partikel bebas yang bisa bergerak dalam struktur logam. Model ini berasal dari dua pendekatan utama: Teori Drude (1900) dan perbaikan lebih lanjut melalui Model Elektron Bebas Sommerfeld (1928), yang memasukkan prinsip-prinsip mekanika kuantum (Allen, 2024).

7.2.1 Teori Drude (Model Klasik Elektron Bebas)

Pada tahun 1900, Drude mengemukakan bahwa logam terdiri dari inti-inti ion positif yang dikelilingi oleh elektron valensi yang dapat bergerak bebas di antara inti-inti tersebut. Elektron-elektron valensi ini tetap berada dalam logam karena adanya gaya tarik elektrostatis antara inti-inti ion positif dan elektron-elektron tersebut. Medan listrik di seluruh bagian dalam logam dianggap seragam, dan gaya tolak-menolak antar elektron diabaikan. Pergerakan elektron-elektron dalam logam disamakan dengan pergerakan atom atau molekul dalam gas mulia. Oleh karena itu, elektron ini dianggap bebas dan disebut sebagai "Gas Elektron

Bebas." Teori ini sering disebut model gas elektron bebas. Namun, ada beberapa perbedaan antara gas elektron bebas dan gas biasa. Pertama, gas elektron bebas bermuatan negatif, sedangkan molekul-molekul gas biasa netral. Kedua, konsentrasi elektron dalam gas elektron bebas jauh lebih tinggi dibandingkan konsentrasi molekul dalam gas biasa (Allen, 2024).

Logam dianggap memiliki struktur kisi tiga dimensi yang terdiri dari ion-ion, dengan elektron valensi yang bergerak bebas di antaranya dan tetap berada dalam material tersebut. Elektron-elektron yang bergerak bebas ini menyebabkan terjadinya konduksi listrik ketika medan listrik diberikan, sehingga disebut sebagai elektron konduksi. Potensial listrik yang dihasilkan oleh inti-inti ion dianggap tetap di seluruh bagian logam, dan pengaruh gaya tolak antar elektron dianggap tidak signifikan. Arus listrik dalam logam yang disebabkan oleh medan listrik merupakan hasil dari kecepatan hanyut (*drift velocity*) elektron yang bergerak berlawanan dengan arah medan. Elektron-elektron bebas ini dianggap seperti molekul gas dan diasumsikan mematuhi hukum-hukum teori kinetik gas (Toruan et al., 2022).

Mengacu pada pernyataan Drude, elektron-elektron yang bergerak secara bebas dalam keadaan setimbang terjadi karena adanya distribusi statistik Maxwell-Boltzmann. Pernyataan kedua ahli ini dikenal sebagai Teori Drude-Lorentz. Karena teori ini didasarkan pada statistik klasik Maxwell-Boltzmann, maka disebut juga sebagai Teori Klasik. Teori ini terbukti berhasil menjelaskan beberapa sifat logam dan dapat membuktikan kebenaran Hukum Ohm. Selain itu, karena elektron dapat bergerak secara bebas dan mudah di dalam logam, maka beberapa logam menunjukkan konduktivitas listrik (σ) dan konduktivitas panas (K) yang tinggi (Irwan et al., 2016). Namun, rasio antara konduktivitas listrik (σ) dan konduktivitas panas (K) selalu tetap yaitu:

$$\frac{\sigma}{K} = \text{Konstan} \quad (7.1)$$

Persamaan (7.1) dikenal sebagai "Wiedemann-Franz Law"

Tanpa adanya medan listrik, energi yang dimiliki oleh masing – masing elektron pada suhu T dinyatakan sebagai:

$$\frac{3}{2}kT$$

Dimana, k merupakan konstanta Boltzmann. Energi yang terbentuk merupakan energi yang berhubungan dengan energi kinetik elektron, yaitu:

$$\frac{3}{2}kT = \frac{1}{2}mv^2 \quad (7.2)$$

1. Konduktivitas Listrik

Konduktivitas listrik merujuk pada kapasitas suatu benda dalam menghantarkan arus listrik. Besarnya konduktivitas listrik menunjukkan seberapa efektif benda tersebut dalam mengalirkan muatan listrik. Bahan dengan konduktivitas tinggi, seperti logam (contohnya tembaga dan aluminium), sangat efisien dalam menghantarkan listrik, sedangkan material dengan konduktivitas rendah, seperti kaca atau plastik, berperan sebagai isolator (L. Muh. Said, 2013).

Berdasarkan teori elektron bebas, pada benda padat, elektron bergerak secara bebas. Ketika sebuah elektron bebas dengan massa m dan memiliki muatan e bekerja pada suatu medan listrik E . Maka, gaya yang bekerja pada suatu elektron adalah:

$$F = eE \quad (7.3)$$

Berdasarkan Hukum Newton II, diketahui:

$$F = ma \quad (7.4)$$

Maka berdasarkan persamaan (7.3) dan (7.4), diketahui percepatan elektron adalah:

$$ma = eE$$

$$a = \frac{eE}{m} \quad (7.5)$$

Percepatan merupakan perubahan kecepatan dalam suatu waktu tertentu, yang dirumuskan sebagai:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (7.6)$$

Sehingga percepatan elektron dapat ditulis sebagai:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{eE}{m}$$

$$dv = \frac{eE}{m} dt$$

$$\int dv = \frac{eE}{m} \int dt$$

$$v = \frac{eE}{m} t + c$$

Ketika,

$$t = 0, \quad \frac{dv}{dt} = 0, \quad c = 0$$

Maka,

$$v = \frac{eE}{m} t \quad (7.7)$$

Jika λ adalah jalur bebas rata - rata elektron maka waktu relaksasi τ saat terjadi tumbukan adalah:

$$\tau = \frac{\lambda}{v} \quad (7.8)$$

Maka kecepatan rata - rata saat terjadi tumbukan yang berurutan adalah:

$$\bar{v} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{eE}{m} t dt$$

$$\bar{v} = \frac{eE}{\tau m} \int_0^{\tau} t dt$$

$$\bar{v} = \frac{eE}{\tau m} \frac{\tau^2}{2}$$

$$\bar{v} = \frac{eE\tau}{2m}$$

Memasukan nilai τ dari persamaan (7.8), maka diperoleh:

$$\bar{v} = \frac{eE\lambda}{2mv} \quad (7.9)$$

Berdasarkan persamaan (7.9), diperoleh:

$$\frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} mv^2$$

$$mv^2 = 3kT$$

$$mv = \frac{3kT}{v}$$

$$\frac{eE\lambda}{2\bar{v}} = \frac{3kT}{v}$$

$$\bar{v} = \frac{eE\lambda v}{6kT} \quad (7.10)$$

Jika J merupakan kepadatan arus, maka menurut Hukum Ohm,

$$J = \sigma E$$

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (7.11)$$

Namun,

$$J = \frac{I}{A}$$

Dimana I adalah arus dan A adalah luas penampang konduktor. Oleh karena itu, persamaan (7.11) dirumuskan menjadi:

$$\sigma = \frac{I}{EA}$$

2. Konduktivitas Panas

Konduktivitas panas merupakan kemampuan benda dalam mentransfer panas. Pada logam, proses ini terutama dipengaruhi oleh pergerakan elektron bebas dan getaran atom atau ion dalam struktur kristal (fonon). Teori Drude menganggap bahwa elektron bebas dalam logam bertindak seperti molekul gas. Dalam model ini, elektron bebas diperlakukan sebagai partikel yang bergerak tanpa hambatan kemudian bertumbukan dengan ion-ion logam di dalam kisi kristal, mirip dengan cara molekul-molekul gas yang saling bertumbukan (Prihartono & Irhamsyah, 2022).

Apabila tidak ada perbedaan suhu antara dua titik dalam suatu batang logam, dimana $T_1 = T_2$, maka tidak ada transfer energi yang terjadi. Jadi, untuk membahas terkait konduktivitas panas dari material logam, kita memperkirakan bahwa adanya gradien suhu sepanjang batang logam dan bukan gradien tegangan. Sehingga transfer energi dapat terjadi karena adanya gradien suhu. Misalkan ada sebuah batang logam, dan masing – masing dari ujung batang logam diberi nama A dan B dimana A memiliki suhu yang lebih tinggi daripada B. Maka perpindahan panas dari A ke B dilakukan oleh elektron. Pada saat bertumbukan, elektron yang berada di sekitar A akan kehilangan energi sedangkan elektron yang berada di dekat B akan mendapat energi (Saputraa et al., 2022).

Jumlah panas Q yang melewati penampang dari batang logam per unit area per detik adalah :

$$Q = \frac{1}{3} nv\lambda \frac{dE}{dt} \quad (7.11)$$

Dimana, λ = jalur bebas rata – rata

v = kecepatan elektron

n = kerapatan bilangan

Berdasarkan teori gas kinetik,

$$E = \frac{3}{2} kT$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{3}{2} k \frac{dT}{dt}$$

Maka dari persamaan (7.11) diperoleh:

$$Q = \frac{1}{2} nv\lambda k \frac{dT}{dt} \quad (7.12)$$

Dimana, $Q = K \frac{dT}{dt}$, sehingga persamaan (7.12) dapat dituliskan sebagai:

$$K \frac{dT}{dt} = \frac{1}{2} nv\lambda k \frac{dT}{dt}$$

Atau,

$$K = \frac{1}{2} nv\lambda k \quad (7.13)$$

Nilai K , telah dibuktikan melalui eksperimen dan teori tentang elektron bebas berhasil menjelaskan terkait konduktivitas panas.

3. Hubungan Antara Konduktivitas Listrik Dan Panas

Hubungan antara konduktivitas listrik (σ) dan Konduktivitas panas (K) disebut juga relasi “Wiedemann-Franz”. Pada tahun 1853, Wiedemann dan Franz menemukan bahwa pada suhu tertentu, logam yang memiliki konduktivitas listrik tinggi juga akan memiliki konduktivitas panas yang tinggi, karena elektron bebas yang sama bertanggung jawab untuk kedua jenis konduktivitas tersebut. Ini menunjukkan bahwa kemampuan logam untuk menghantarkan listrik dan panas bergantung pada sifat elektron-elektron tersebut, dan rasio antara keduanya tetap konstan pada suhu tertentu (Allen, 2024).

Berdasarkan persamaan (1):

$$\frac{\sigma}{K} = \frac{ne^2\lambda v}{6kT} : \frac{1}{2} nv\lambda k$$

$$\frac{\sigma}{K} = \frac{\frac{1}{2}nv\lambda k \cdot 6kT}{ne^2\lambda v}$$

$$\frac{\sigma}{K} = 3\left(\frac{k}{e}\right)^2 T$$

Maka,

$$\frac{\sigma}{K} \propto T$$

4. Kegagalan Teori Drude

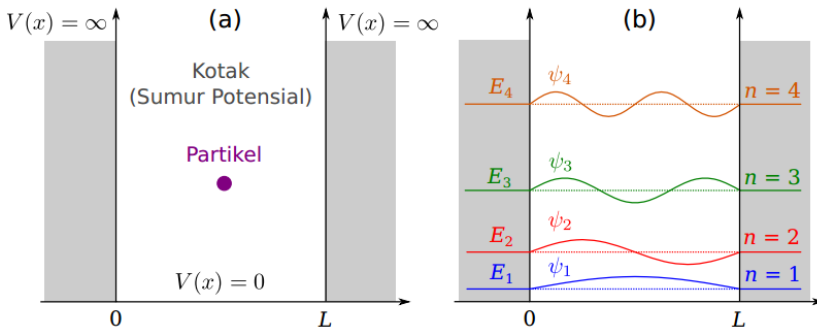
Teori Drude tidak mampu menjelaskan ketergantungan resistivitas terhadap suhu. Menurut teori ini, resistivitas listrik adalah fungsi akar kuadrat dari suhu (T), sedangkan dalam kenyataannya, resistivitas listrik berbanding lurus dengan suhu. Kegagalan lainnya mencakup penjelasan mengenai kapasitas panas elektron konduksi dan suseptibilitas paramagnetik elektron konduksi. Teori Drude memperkirakan nilai kapasitas panas dan suseptibilitas paramagnetik yang jauh lebih besar daripada yang diperoleh melalui pengamatan eksperimen.

7.2.2 Teori Sommerfeld (Pendekatan Kuantum)

Model Elektron Bebas Sommerfeld, atau teori kuantum Sommerfeld, merupakan penyempurnaan dari Teori Drude untuk menggambarkan sifat konduktif logam dengan lebih tepat melalui penerapan prinsip-prinsip mekanika kuantum. Dikembangkan oleh Arnold Sommerfeld pada tahun 1928, model ini menggabungkan statistik Fermi-Dirac dan prinsip-prinsip kuantum guna menjelaskan perilaku elektron dalam logam, khususnya pada suhu rendah serta di bawah pengaruh medan listrik atau magnet (Eckerta, 2014).

Apabila diketahui adanya elektron yang bermassa m bergerak bebas dalam kristal satu dimensi dengan panjang L (Gambar 7.1). Elektron ini tidak bisa keluar dari kristal karena

terdapat penghalang potensial yang sangat tinggi di permukaan kristal. Kondisi ini dapat diilustrasikan dengan membuat kotak (sumur) potensial satu dimensi menggunakan garis yang dibatasi oleh energi potensial tak hingga (Deeney & O'Sullivan, 2014).



Gambar 7.1. Kotak potensial satu dimensi (a) dan (b) tingkat energi dan fungsi gelombang.

Potensial V didefinisikan sebagai

$$V = \begin{cases} 0, & \text{untuk } 0 < x < L \\ \infty, & \text{untuk } x < 0 \text{ dan } x > L \end{cases}$$

Persamaan gelombang Schrodinger untuk fungsi gelombang dari elektron yang bergerak sepanjang garis lurus dapat ditulis sebagai

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V)\psi = 0 \quad (7.14)$$

Dimana E merupakan energi kinetik elektron bebas.

Untuk elektron bebas yang berada di dalam kotak potensial saat $V=0$, maka

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2mE}{\hbar^2} \psi = 0 \quad (7.15)$$

Karena diketahui

$$k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2} \quad (7.16)$$

Maka persamaan (7.16) dapat ditulis sebagai

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + k^2\psi = 0$$

Solusi umum dari persamaan (7.17) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\psi(x) = A \sin kx + B \cos kx \quad (7.17)$$

Dimana A dan B adalah suatu konstanta sembarang yang telah ditentukan dari syarat batas.

Berdasarkan Gambar 7.1(a), diketahui bahwa kedalaman kotak potensial bernilai tak hingga sehingga elektron tidak mungkin ditemukan di luar kotak potensial tersebut. Dengan demikian, kondisi di luar kotak adalah $\Psi(x)=0$.

Saat $x = 0$, maka $\Psi(x)=0$, sehingga

$$\psi(x) = A \sin kx \quad (7.18)$$

Selain itu, syarat batas lainnya yaitu saat $x = L$, maka diperoleh

$$kL = n\pi$$

atau

$$k = \frac{n\pi}{L} \quad (7.19)$$

dengan nilai $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ dst

Nilai k , dapat juga dituliskan dengan

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Maka persamaan (7.19) menjadi

$$\frac{2\pi}{\lambda} = \frac{n\pi}{L} \quad (7.20)$$

atau

$$L = \frac{n\lambda}{2}$$

Dengan demikian, persamaan (7.5) dapat dituliskan sebagai

$$\psi(x) = A \sin \left(\frac{n\pi}{L} \right) x \quad (7.21)$$

Persamaan (7.21) merupakan fungsi gelombang yang berada dalam kotak potensial pada ketinggian tak hingga.

Sedangkan tingkat energi elektron dalam kotak potensial dapat dituliskan berdasarkan relasi $E = h^2 k^2 / 2m$, yakni

$$E = \frac{h^2}{2m} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 ; n = 1, 2, \dots \quad (7.22)$$

Tingkatan energi saat $n = 1$ sampai $n = 4$ beserta fungsi gelombang yang bersesuaian dapat diamati pada Gambar 7.1(b). fungsi gelombang untuk elektron dalam kotak potensial dapat dinormalisasikan sehingga konstanta A memiliki nilai:

$$\int_0^L A^2 \sin^2 \left(\frac{n\pi x}{L} \right) dx = A^2 \frac{L}{2} = 1$$

$$\therefore A = \sqrt{\frac{2}{L}}$$

Bentuk normalisasi $A = \sqrt{2/L}$ menunjukkan bahwa secara umum, A merupakan bilangan kompleks. Namun, agar lebih mudah dalam pembahasan lebih lanjut, kita cukup mengambil A dalam bentuk bilangan riil (Nugraha, 2018). Sehingga bentuk fungsi gelombang yang telah dinormalisasikan dapat dituliskan sebagai:

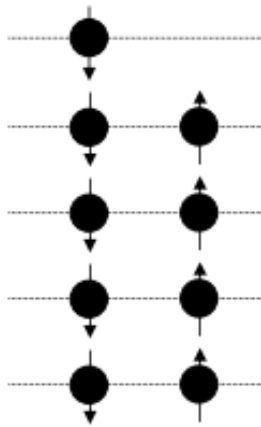
$$\psi(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \left(\frac{n\pi x}{L} \right) \quad (7.23)$$

1. Energi Fermi

Sekarang kita akan membahas bagaimana cara mendistribusikan elektron ke dalam tingkatan energi yang tersedia. Elektron akan didistribusikan ke dalam tingkatan energi yang sesuai berdasarkan prinsip Pauli yang menyatakan bahwa setiap tingkat energi hanya dapat ditempati paling banyak satu buah elektron saja, kecuali jika arah spin elektron tersebut berbeda atau dengan kata lain satu tingkat energi dapat ditempati oleh dua elektron asalkan arah spin kedua elektron tersebut berbeda (Saunders, 2009).

Untuk pasangan elektron, salah satu elektron memiliki arah spin ke atas sedangkan yang lainnya ke bawah, akan menempati tingkat energi terendah. Pasangan elektron yang lain akan menempati tingkat energi berikutnya, demikian seterusnya hingga semua elektron dalam logam menempati

posisinya. Sebagai ilustrasi, jika terdapat 9 elektron (4 dengan spin ke atas dan 5 dengan spin ke bawah) dalam keadaan dasar (ground state), maka jumlah tingkat energi yang dibutuhkan adalah 5 tingkat ($n = 1, 2, 3, 4, \text{ dan } 5$), bukan 9 tingkat. Hal ini karena setiap tingkat energi dapat ditempati oleh dua elektron dengan spin yang berlawanan (spin ke atas dan spin ke bawah), seperti yang tampak pada Gambar 7.2 (Deeney & O'Sullivan, 2014).



Gambar 7.2. Sembilan elektron menempati lima tingkatan energi dalam keadaan dasar.

Tingkat energi maksimum yang dapat ditempati oleh elektron pada suhu 0°K disebut sebagai tingkat energi Fermi, dinyatakan dengan E . Saat logam tidak dipengaruhi oleh medan eksternal, seluruh tingkat di atas energi Fermi akan kosong, sementara tingkat di bawahnya terisi sepenuhnya.

2. Distribusi Fermi – Dirac

Elektron pada tingkat energi di bawah tingkat Fermi tidak dapat menyerap energi saat suhu melebihi nol absolut. Ketika material berada pada suhu di atas 0°K , energi termal dari lingkungan menyebabkan elektron tereksitasi secara termal, dan beberapa elektron bergerak ke tingkat energi lebih tinggi

yang kosong pada 0°K. Walaupun eksitasi ini terjadi secara acak, distribusi elektron di berbagai tingkat energi akan mengikuti pola yang diatur oleh fungsi statistik dalam kondisi tunak. Pengisian tingkat energi ini mengikuti distribusi statistik yang dikenal sebagai hukum “Distribusi Fermi-Dirac” (Saunders, 2009).

Berdasarkan hukum distribusi di atas, suhu berpengaruh terhadap penempatan elektron dalam tingkat – tingkat energi. Pengaruh suhu ini diatur oleh fungsi distribusi yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E-E_f}{kT}\right)+1} \quad (7.24)$$

Dimana, $f(E)$ = peluang menemukan elektron pada tingkat energi

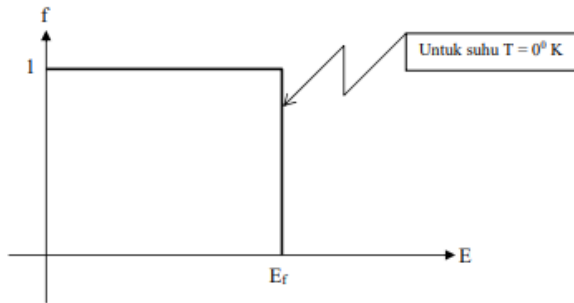
k = konstanta Boltzmann

T = suhu dalam satuan kelvin

E_f = energi potensial kima

E = energi dari suatu tingkat energi

Persamaan (7.24) menunjukkan bahwa $f(E)$ menyatakan besarnya peluang elektron untuk menempati sebuah tingkat energi (E) pada suhu T . sehingga nilai $f(E)$ berkisar antara $0 \leq f(E) \leq 1$. Sehingga pada saat $T=0^\circ\text{K}$, elektron akan mengisi semua tingkat energi yang terletak di bawah energi Fermi dan energi Fermi itu sendiri. Artinya, peluang untuk menemukan elektron pada tingkat energi di atas energi Fermi adalah 0%. Sebaliknya peluang untuk menemukan elektron di tingkat – tingkat energi saat $T = 0^\circ\text{K}$ adalah 1 atau 100%. Peluang elektron menempati tingkat energi dapat diamati pada Gambar 7.3 (Eckerta, 2014).



Gambar 7.3. Peluang elektron menempati tingkat energi saat $T=0^\circ\text{K}$.

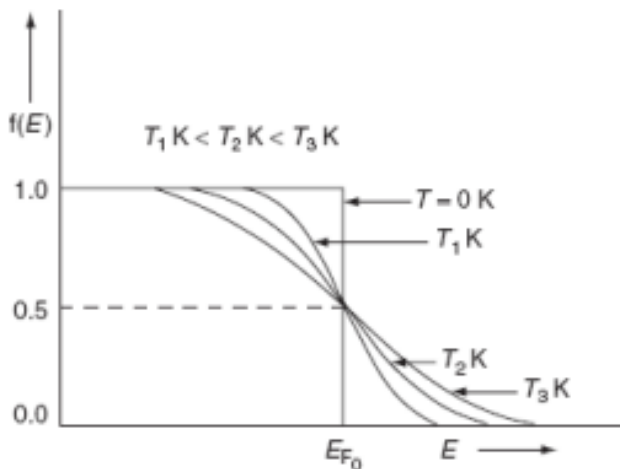
Saat $T > 0^\circ\text{K}$, maka fungsi distribusi Fermi-Dirac menjadi

$$f(E) = \frac{1}{1 + \frac{\exp(E - E_f)}{kT}} < 1, \text{ saat } E < E_f$$

$$> 0, \text{ saat } E > E_f$$

$$= \frac{1}{2}, \text{ saat } E = E_f$$

Peluang elektron menempati suatu tingkatan energi bergantung pada suhu dan energi seperti yang tampak pada Gambar 7.4.



Gambar 7.4. Ketergantungan $f(E)$ pada suhu dan energi.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, P. B. (2024). *Free Electron Theory for Thin Metal Films*. 1–12.
<http://arxiv.org/abs/2406.16197>
- Deeney, T., & O'Sullivan, C. (2014). Sommerfeld's elliptical atomic orbits revisited—A useful preliminary to the study of quantum mechanics. *American Journal of Physics*, 82(9), 883–886. <https://doi.org/10.1119/1.4881955>
- Eckerta, M. (2014). How Sommerfeld extended Bohr's model of the atom (1913-1916). *European Physical Journal H*, 39(2), 141–156. <https://doi.org/10.1140/epjh/e2013-40052-4>
- Irwan, F., Afdal, A., & Arlindia, I. (2016). *Kajian Hubungan Konduktivitas Listrik Dengan Konsentrasi Padatan Terlarut Pada Air Permukaan*. V, SNF2016-CIP-7-SNF2016-CIP-10. <https://doi.org/10.21009/0305020102>
- L. Muh. Said. (2013). Analisis Sifat Konduktivitas Listrik Pada Beberapa Jenis Material Dengan Metode Potensial Jatuh. *Jurnal Teknosains*, 7(1), 66–77.
- Nugraha, A. ridwan tresna. (2018). *Persamaan Schrödinger*. 1–20.
- Prihartono, J., & Irhamisyah, R. (2022). Analisis Konduktivitas Termal pada Material Logam (Tembaga, Alumunium dan Besi). *Jurnal Teknik Mesin Presisi*, 24(2), 49–54.
- Saputraa, A., Samhuddin, S., & Hasanudin, L. (2022). Perancangan Dan Analisis Pengujian Konduktivitas Panas Pada Tipe Material Padat. *Enthalpy: Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Mesin*, 7(1), 22. <https://doi.org/10.55679/enthalpy.v7i1.24502>
- Saunders, S. (2009). Compendium of Quantum Physics. *Compendium of Quantum Physics*, January. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-70626-7>
- Toruan, P. L., Rahmawati, & Andi Arif Setiawan. (2022). *Konduktivitas Listrik Ion Terlarut : Studi Kasus*. 7, 48–54.

BAB 8

SEMIKONDUKTOR

Oleh Sefrilita Risqi Adikaning Rani

8.1 Pendahuluan

Dalam fisika zat padat, semikonduktor merupakan bahan yang memiliki sifat konduktivitas listrik yang berada di antara konduktor (seperti logam) dan isolator (seperti kaca). Sifat unik ini menjadikan semikonduktor komponen utama dalam perangkat elektronik modern seperti dioda, transistor, dan sirkuit terintegrasi (IC). Memahami sifat dasar semikonduktor dan fenomena yang terkait dengannya adalah kunci dalam bidang fisika zat padat. Semikonduktor biasanya didefinisikan secara longgar sebagai material dengan resistivitas listrik yang berada dalam kisaran 10^{-2} sampai $10^9 \Omega\text{cm}$.¹ Atau, semikonduktor dapat didefinisikan sebagai material yang celah energinya untuk eksitasi elektronik berada di antara nol dan sekitar 4 elektron volt (eV). Material dengan celah pita nol adalah logam atau semilogam, sedangkan material dengan celah energi lebih besar dari 3 eV lebih sering dikenal sebagai bahan isolator. Ada pengecualian untuk definisi ini. Misalnya, istilah seperti semikonduktor berlian (yang celah energinya sekitar 6 eV) dan GaAs semi-isolasi (dengan celah energi 1,5 eV) sering digunakan. GaN, yang menerima banyak perhatian sebagai material optoelektronik di wilayah biru, memiliki celah 3,5 eV.

Semikonduktor yang paling dikenal tidak diragukan lagi adalah silikon (Si). Akan tetapi, ada banyak semikonduktor selain silikon. Faktanya, banyak mineral yang ditemukan di alam, seperti seng-blende (ZnS), kuprit (Cu₂O), dan galena (PbS), untuk menyebutkan beberapa saja, adalah semikonduktor. Termasuk semikonduktor yang disintesis di laboratorium, keluarga semikonduktor membentuk salah satu kelas material paling serbaguna yang dikenal manusia. Semikonduktor terdapat dalam berbagai komposisi kimia dengan berbagai macam struktur kristal. Semikonduktor dapat berupa semikonduktor unsur, seperti Si,

karbon dalam bentuk C_{60} atau nanotube dan selenium (Se) atau senyawa biner seperti galium arsenida (GaAs). Banyak senyawa organik, misalnya poliasetilen $(CH)_n$ merupakan semikonduktor. Beberapa semikonduktor menunjukkan perilaku magnetik ($Cd_{1-x}MnTe$) atau feroelektrik (SbSI). Yang lainnya menjadi superkonduktor ketika didoping dengan pembawa yang cukup (GeTe dan $SrTiO_3$). Banyak superkonduktor ber- T_c tinggi yang baru ditemukan memiliki fase non-logam yang merupakan semikonduktor. Misalnya, La_2CuO_4 adalah semikonduktor (gap 2 eV) tetapi menjadi superkonduktor ketika dicampur dengan Sr untuk membentuk $(La_{1-x}Sr_x)_2CuO_4$. (Yu & Cardona, 2010).

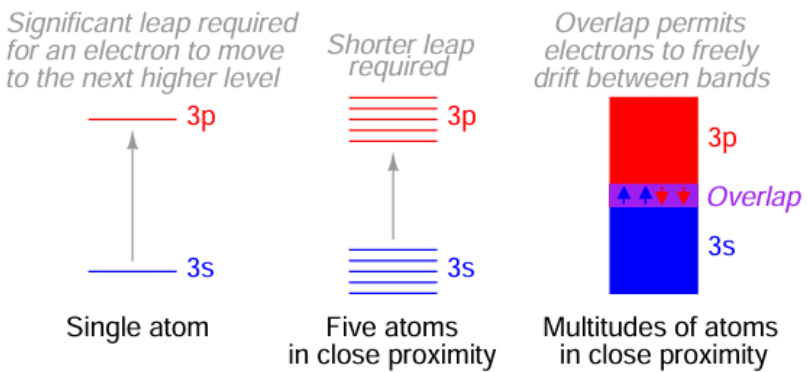
Fisikawan Richard P. Feynman mengatakan bahwa penemuan perangkat semikonduktor merupakan sebuah revolusi bukanlah suatu pernyataan yang berlebihan. Ini bukan hanya merupakan pencapaian teknologi yang mengesankan, tetapi juga membuka jalan bagi perkembangan yang akan mengubah masyarakat modern secara permanen. Perangkat semikonduktor memungkinkan terciptanya elektronik miniatur, termasuk komputer, jenis peralatan diagnostik dan perawatan medis tertentu, dan perangkat telekomunikasi populer, untuk menyebutkan beberapa aplikasi teknologi.

8.2 Struktur Pita Energi Semikonduktor

Fisika kuantum menggambarkan keadaan elektron dalam atom menurut skema empat kali lipat bilangan kuantum. Bilangan kuantum menggambarkan keadaan elektron yang diizinkan dalam atom. Untuk menggunakan analogi amfiteater, bilangan kuantum menggambarkan berapa banyak baris dan kursi yang tersedia. Elektron individual dapat dijelaskan dengan kombinasi bilangan kuantum, seperti penonton di amfiteater yang ditempatkan pada baris dan kursi tertentu.

Seperti penonton di amfiteater yang bergerak di antara kursi dan baris, elektron dapat mengubah status mereka, mengingat adanya ruang yang tersedia bagi mereka untuk masuk, dan energi yang tersedia. Karena tingkat kulit sangat erat kaitannya dengan jumlah energi yang dimiliki elektron, "lompatan" antara tingkat kulit (dan bahkan subkulit) memerlukan transfer energi. Jika elektron

akan bergerak ke kulit tingkat yang lebih tinggi, diperlukan energi tambahan yang diberikan kepada elektron dari sumber eksternal. Dengan menggunakan analogi amfiteater, diperlukan peningkatan energi bagi seseorang untuk bergerak ke baris kursi yang lebih tinggi, karena orang tersebut harus memanjat ke ketinggian yang lebih tinggi melawan gaya gravitasi. Sebaliknya, elektron yang "melompat" ke kulit yang lebih rendah melepaskan sebagian energinya, seperti seseorang yang melompat ke baris kursi yang lebih rendah, energi yang dikeluarkan terwujud sebagai panas dan suara. Tidak semua "lompatan" sama. Lompatan antara kulit yang berbeda memerlukan pertukaran energi yang substansial, tetapi lompatan antara subkulit atau antara orbital memerlukan pertukaran yang lebih sedikit. Ketika atom-atom bergabung untuk membentuk zat, kulit terluar, subkulit, dan orbital bergabung, menyediakan lebih banyak tingkat energi yang tersedia bagi elektron untuk diasumsikan. Ketika sejumlah besar atom saling berdekatan, tingkat energi yang tersedia ini membentuk hampir pita kontinu dimana elektron dapat bergerak seperti yang diilustrasikan pada Gambar 8.1.

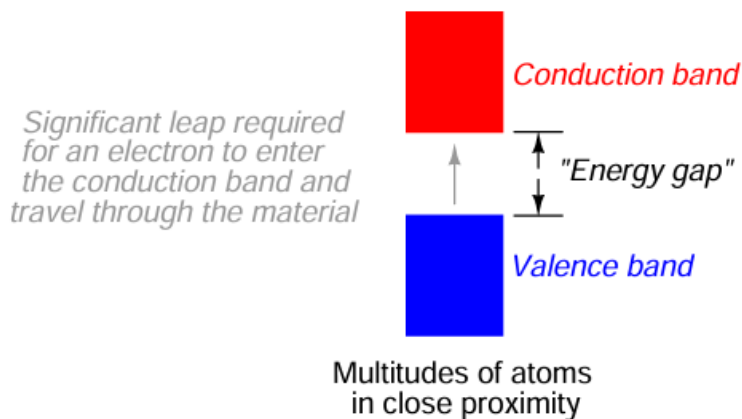


Gambar 8.1. Tumpang tindih pita elektron pada unsur logam

Lebar pita-pita ini dan kedekatannya dengan elektron yang ada menentukan seberapa besar mobilitas elektron tersebut ketika terkena medan listrik. Pada zat logam, pita kosong tumpang tindih dengan pita yang berisi elektron, yang berarti elektron dari satu

atom dapat berpindah ke keadaan yang biasanya lebih tinggi dengan sedikit atau tanpa tambahan energi diberikan. Dengan demikian, elektron terluar dikatakan “bebas” dan siap bergerak sesuai perintah medan listrik.

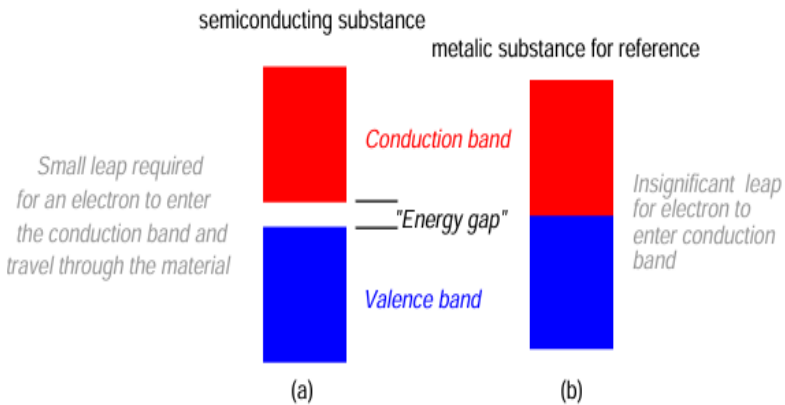
Tumpang tindih pita tidak akan terjadi pada semua zat, tidak peduli berapa banyak atom yang berdekatan. Pada beberapa zat, celah substansial tetap ada antara pita tertinggi yang mengandung elektron (yang disebut pita valensi) dan pita berikutnya, yang kosong (yang disebut pita konduksi). Lihat Gambar 8.2. Akibatnya, elektron valensi “terikat” pada atom-atom penyusunnya dan tidak dapat bergerak dalam zat tersebut tanpa sejumlah besar energi yang diberikan. Zat-zat ini adalah isolator listrik. Bahan yang termasuk dalam kategori semikonduktor memiliki celah sempit antara pita valensi dan pita konduksi. Dengan demikian, jumlah energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan elektron valensi ke pita konduksi tempat elektron tersebut bergerak cukup kecil. (Gambar 8.3.)



Gambar 8.2. Pemisahan pita elektron pada bahan isolator

Pada suhu rendah, hanya sedikit energi termal yang tersedia untuk mendorong elektron valensi celah ini, dan bahan semikonduktor bertindak lebih sebagai isolator. Pada suhu yang lebih tinggi, meskipun, energi termal sekitar menjadi cukup untuk memaksa elektron melintasi celah, dan bahan akan meningkatkan konduksi listrik. Sulit untuk memprediksi sifat konduktif suatu zat

dengan memeriksa konfigurasi elektron dari atom-atom penyusunnya. Meskipun konduktor listrik logam terbaik (perak, tembaga, dan emas) semuanya memiliki subkulit s terluar dengan satu elektron, hubungan antara konduktivitas dan jumlah elektron valensi tidak selalu konsisten.



Gambar 8.3. Pemisahan pita elektron pada zat semikonduktor, (a) banyaknya atom semikonduktor yang berdekatan masih menghasilkan celah pita yang signifikan, (b) banyaknya atom logam yang berdekatan sebagai referensi

Konfigurasi pita elektron yang dihasilkan oleh senyawa unsur-unsur yang berbeda tidak dapat dengan mudah dikaitkan dengan konfigurasi elektron unsur-unsur penyusunnya.

TINJAUAN:

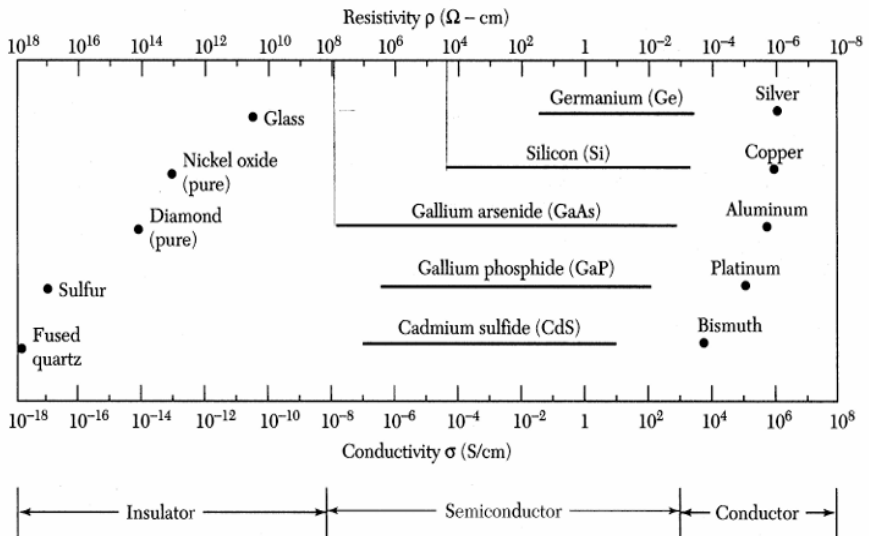
1. Energi dibutuhkan untuk memindahkan elektron dari pita valensi ke pita yang lebih tinggi dan tidak terisi, yaitu pita konduksi. Energi yang dibutuhkan untuk berpindah antarkulit lebih besar, sedangkan untuk berpindah antarsubkulit lebih kecil.
2. Karena pita valensi dan pita konduksi saling tumpang tindih dalam logam, hanya sedikit energi yang melepaskan elektron. Logam merupakan konduktor yang sangat baik.
3. Celah yang besar antara pita valensi dan pita konduksi pada isolator membutuhkan energi yang tinggi untuk melepaskan

elektron. Dengan demikian, isolator tidak menghantarkan listrik.

4. Semikonduktor memiliki celah kecil yang tidak tumpang tindih antara pita valensi dan pita konduksi. Semikonduktor murni bukanlah isolator atau konduktor yang baik. Semikonduktor bersifat semi-konduktif(Kuphaldt, n.d.).

8.3 Bahan Semikonduktor

Tiga kategori utama bahan solid-state adalah konduktor, semikonduktor, dan isolator. Gambar 8.4 menunjukkan rentang konduktivitas listrik (dan resistivitas terkait, $\rho=1/\sigma$) dari berbagai material penting yang termasuk dalam kategori tersebut. Konduktor seperti perak dan aluminium memiliki konduktivitas yang sangat tinggi, kira-kira 10^{-18} - 10^{-8} S/cm, sementara isolator seperti kuarsa dan kaca yang menyatu memiliki konduktivitas yang sangat rendah, kira-kira 10^{-18} hingga 10^{-8} S/cm. Semikonduktor berada di antara konduktor dan isolator. Konduktivitas semikonduktor sangat sensitif terhadap berbagai hal, termasuk suhu, pencahayaan, medan magnet, dan jumlah atom pengotor yang relatif kecil. Jumlah atom pengotor biasanya berkisar antara 1 μg hingga 1 g per kilogram bahan semikonduktor. Semikonduktor adalah bahan yang sangat penting untuk aplikasi elektronik karena sensitivitasnya terhadap konduktivitas.



Gambar 8.4. Kisaran konduktivitas umum untuk isolator, semikonduktor, dan konduktor.

Tabel 8.1. Bagian Tabel Periodik Terkait Semikonduktor

Period	Column II	III	IV	V	VI
2		B	C	N	O
		Boron	Carbon	Nitrogen	Oxygen
3	Mg	Al	Si	P	S
	Magnesium	Aluminum	Silicon	Phosphorus	Sulfur
4	Zn	Ga	Ge	As	Se
	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic	Selenium
5	Cd	In	Sn	Sb	Te
	Cadmium	Indium	Tin	Antimony	Tellurium
6	Hg		Pb		
	Mercury		Lead		

Pada awal abad kesembilan belas, penelitian tentang bahan semikonduktor dimulai. Banyak semikonduktor telah diselidiki selama bertahun-tahun. Sebagian dari tabel periodik yang berkaitan dengan semikonduktor ditunjukkan dalam Tabel 1. Semikonduktor unsur terdiri dari unsur tunggal spesies atom, seperti germanium (Ge) dan silikon (Si). Pada awal 1950-an, germanium adalah bahan utama dalam pembuatan semikonduktor, tetapi sejak awal 1960-an, silikon menjadi bahan praktis yang hampir menggantikan

germanium dalam pembuatan semikonduktor. Sekarang kita menggunakan silikon karena sifatnya yang lebih baik pada suhu kamar dan kemampuan silikon dioksida berkualitas tinggi untuk tumbuh secara termal. Silikon kelas perangkat juga lebih murah daripada bahan semikonduktor lainnya. Dalam bentuk silika dan silikat, silikon membentuk 25% kerak bumi. Dalam kelimpahan, silikon berada di posisi kedua setelah oksigen. Saat ini, silikon berada di antara komponen yang paling banyak dipelajari dalam tabel periodik, dan teknologinya adalah yang paling canggih dari semua teknologi semikonduktor.

Sejumlah semikonduktor majemuk telah menemukan aplikasi untuk berbagai perangkat dalam beberapa tahun terakhir. Tabel 8.2 menampilkan semikonduktor majemuk penting dan semikonduktor dua elemen. Semikonduktor majemuk biner adalah kombinasi dari dua elemen dari tabel periodik. Misalnya, galium arsenida (GaAs), yang merupakan kombinasi galium (Ga) dari Kolom III dan arsenik (As) dari Kolom V, adalah senyawa III-V. Ternary, kuaterner, dan senyawa biner juga dibuat untuk tujuan tertentu. Salah satu contoh senyawa ternary adalah semikonduktor paduan $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, yang memiliki Al dan Ga dari Kolom III dan As dari Kolom V. Di sisi lain, senyawa kuaterner dalam bentuk $\text{A}_x\text{B}_{1-x}\text{C}_y\text{D}_{1-y}$ dapat dibuat dengan menggabungkan berbagai semikonduktor senyawa biner dan ternary. Misalnya, GaP, InP, InAs, dan GaAs dapat dikombinasikan untuk menghasilkan semikonduktor paduan $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$. Persiapan semikonduktor senyawa dalam bentuk kristal tunggal biasanya memerlukan proses yang lebih kompleks daripada persiapan semikonduktor unsur.

Tabel 8.2. Material semikonduktor

General Classification	Semiconductor	
	Symbol	Name
Element	Si	Silicon
	Ge	Germanium
Binary compound		
IV-IV -----	SiC	Silicon carbide
III-V -----	AlP	Aluminum phosphide
	AlAs	Aluminum arsenide
	AlSb	Aluminum antimonide
	GaN	Gallium nitride
	GaP	Gallium phosphide
	GaAs	Gallium arsenide
	GaSb	Gallium antimonide
	InP	Indium phosphide
	InAs	Indium arsenide
	InSb	Indium antimonide
II-VI -----	ZnO	Zinc oxide
	ZnS	Zinc sulfide
	ZnSe	Zinc selenide
	ZnTe	Zinc telluride
	CdS	Cadmium sulfide
	CdSe	Cadmium selenide
	CdTe	Cadmium telluride
	HgS	Mercury sulfide
IV-VI -----	PbS	Lead sulfide
	PbSe	Lead selenide
	PbTe	Lead telluride
Ternary compound	$Al_xGa_{1-x}As$	Aluminum gallium arsenide
	$Al_xIn_{1-x}As$	Aluminum indium arsenide
	$GaAs_{1-x}P_x$	Gallium arsenic phosphide
	$Ga_xIn_{1-x}As$	Gallium indium arsenide
	$Ga_xIn_{1-x}P$	Gallium indium phosphide
Quaternary compound	$Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$	Aluminum gallium arsenic antimonide
	$Ga_xIn_{1-x}As_{1-y}P_y$	Gallium indium arsenic phosphide

Aplikasi elektronik dan fotonik berkecepatan tinggi membutuhkan semikonduktor majemuk, terutama GaAs, yang memiliki sifat listrik dan optik yang berbeda dari silikon. Meskipun kita tidak tahu banyak tentang teknologi semikonduktor majemuk seperti yang kita ketahui tentang silikon, kemajuan yang telah dilakukan di bidang ini telah sebanding dengan kemajuan yang dilakukan di bidang semikonduktor majemuk. Buku ini terutama membahas fisika dan teknologi perangkat yang digunakan untuk memproses silikon dan galium arsenida.

8.4 Jenis-jenis Semikonduktor

8.4.1 Semikonduktor Intrinsik

Semikonduktor intrinsik adalah semikonduktor murni tanpa pengotor. Dalam semikonduktor ini, konduktivitas listrik sangat dipengaruhi oleh eksitasi termal, yaitu proses di mana energi panas menyebabkan elektron bergerak dari pita valensi ke pita konduksi. Pada suhu nol absolut, tidak ada elektron yang cukup energinya untuk melompat ke pita konduksi, sehingga semikonduktor murni bersifat isolator. Namun, pada suhu yang lebih tinggi (misalnya suhu kamar), sebagian elektron memiliki cukup energi untuk melompati celah energi dan masuk ke pita konduksi, memungkinkan aliran arus listrik. Semikonduktor intrinsik merupakan material semikonduktor yang murni, tanpa adanya pengotor (doping) yang dimasukkan ke dalam strukturnya. Contoh klasik dari semikonduktor intrinsik adalah silikon (Si) dan germanium (Ge). Material ini memiliki sifat konduktivitas listrik yang sangat unik karena konduktivitasnya tergantung pada eksitasi termal elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Sifat ini menjadi kunci dalam perangkat elektronik seperti transistor dan dioda. Elektron yang berpindah dari pita valensi ke pita konduksi meninggalkan "lubang" (hole) di pita valensi, yang berperan seolah-olah seperti partikel bermuatan positif. Dalam semikonduktor intrinsik, jumlah elektron dalam pita konduksi sama dengan jumlah lubang dalam pita valensi.

Sekarang kita mengetahui konsentrasi pembawa muatan dalam kondisi kesetimbangan termal, yang berarti kondisi keadaan tetap pada suhu tertentu tanpa eksitasi dari sumber luar seperti cahaya, tekanan, atau medan listrik. Akibat agitasi termal yang berkelanjutan, elektron dikeluarkan dari pita valensi ke pita konduksi, meninggalkan pita valensi dengan lubang yang sama. Semikonduktor intrinsik memiliki jumlah pengotor yang sangat kecil dibandingkan dengan elektron dan lubang yang dibuat secara termal. Untuk mengetahui kerapatan elektron (jumlah elektron per satuan volume) dalam semikonduktor intrinsik, kita pertama-tama melakukan pengukuran kerapatan elektron dalam rentang energi inkremental (dE). Kerapatan elektron dalam pita konduksi diperoleh dengan mengintegrasikan $N(E) F(E) dE$ dari dasar pita konduksi (yang pada awalnya dianggap $E=0$ untuk

penyederhanaan) ke atas pita konduksi E_{top} . Dengan demikian, kerapatan $n(E)$ diberikan oleh kali kerapatan keadaan $N(E)$, yaitu kerapatan keadaan energi yang diizinkan (termasuk spin elektron) per rentang energi per satuan volume dan oleh kemungkinan menempati rentang energi tersebut $F(E)$.

$$n = \int_0^{E_{top}} n(E) dE = \int_0^{E_{top}} N(E) F(E) dE \quad (1)$$

di mana n dalam cm^3 , dan $N(E)$ dalam $(\text{cm}^3\text{-eV})^{-1}$. Probabilitas bahwa sebuah elektron menempati keadaan elektronik dengan energi E diberikan oleh fungsi distribusi Fermi-Dirac, yang juga disebut fungsi distribusi Fermi.

$$F(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_f)/kT}} \quad (2)$$

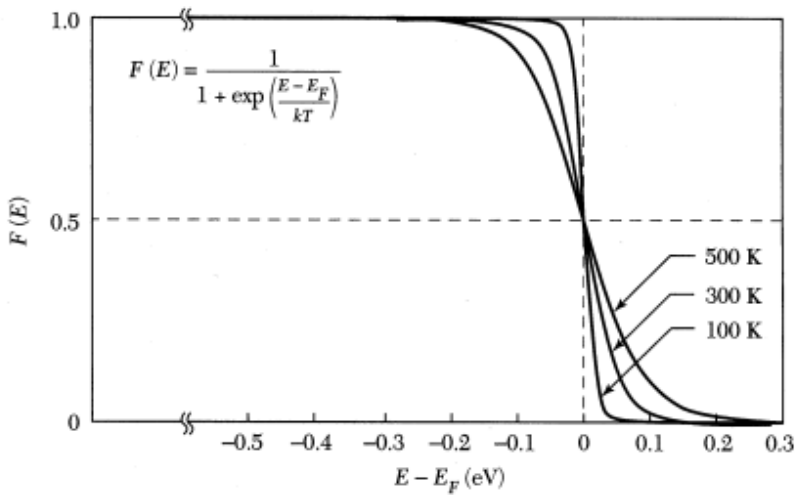
Di mana T adalah suhu absolut dalam derajat Kelvin, k adalah konstanta Boltzmann, dan E_f adalah energi tingkat Fermi, energi Fermi adalah energi di mana kemungkinan tinggalnya elektron tepat setengahnya. Gambar 8.5 menunjukkan dispersi Fermi untuk berbagai suhu. Perhatikan bahwa $F(E)$ simetris di sekitar energi Fermi E . Untuk energi $3kT$ di atas atau di bawah energi Fermi, suku eksponensial dalam Persamaan 2 harus lebih besar dari 20 atau kurang dari 0,05. Oleh karena itu, ekspresi yang lebih sederhana dapat digunakan untuk menjelaskan fungsi distribusi Fermi:

$$F(E) \cong e^{-\frac{E-E_f}{kT}} \quad \text{for } (E - E_f) > 3kT \quad (3)$$

$$F(E) \cong 1 - e^{-\frac{E-E_f}{kT}} \quad \text{for } (E - E_f) < 3kT \quad (4)$$

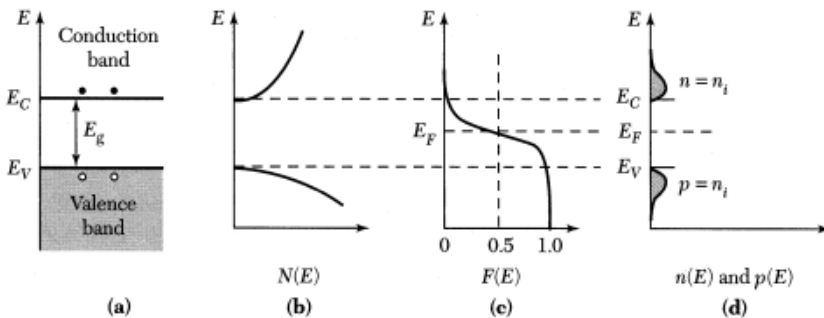
Probabilitas bahwa sebuah lubang akan menempati keadaan yang terletak pada energi E diwakili oleh Persamaan 4.

Gambar 8.6 secara skematis menunjukkan diagram pita dari kiri ke kanan, dengan kerapatan keadaan $N(E)$ bervariasi sebesar $\sqrt{E}$ untuk massa elektron efektif tertentu, fungsi distribusi Fermi, dan konsentrasi pembawa semikonduktor intrinsik. Konsentrasi pembawa dapat ditentukan secara grafis dari Gambar 8.6 menggunakan Persamaan 9. Artinya, produk $N(E)$ pada Gambar 8.6b. $F(E)$ pada Gambar 5.6c. Kurva $n(E)$ versus E (kurva atas) pada Gambar 8.6d dihasilkan. Area yang diarsir di atas Gambar 8.6d. Menurut kerapatan elektron.



Gambar 8.5. Fungsi distribusi Fermi $F(E)$ versus $(E - E_f)$ untuk berbagai suhu

Dalam pita konduksi, ada banyak keadaan yang diizinkan, tetapi untuk semikonduktor intrinsik, kemungkinan elektron menempati salah satu keadaan ini sangat kecil. Dalam pita valensi juga, ada banyak keadaan yang diizinkan. Sebaliknya, elektron bertanggung jawab atas sebagian besar keadaan ini.



Gambar 8.6. Semikonduktor intrinsik. (a) Diagram pita skematik. (b) Kepadatan keadaan. (c) Fungsi distribusi fermi. (d) Konsentrasi pembawa

Oleh karena itu, probabilitas bahwa sebuah elektron menempati salah satu keadaan ini pada pita valensi adalah kira-kira

1. Hanya ada beberapa keadaan elektronik kosong, atau lubang, pada pita valensi. Seperti yang terlihat, level Fermi berada di dekat tengah celah pita (yaitu, E_f beberapa kT di bawah E_c). Dengan menyatakan persamaan kepadatan keadaan. Berikut merupakan persamaan kepadatan keadaan

$$N(E) = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} E^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Substitusikan persamaan kepadatan densitas (per 5) ke persamaan 3 sehingga diperoleh

$$n = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_c (kT)^{-3/2} \int_0^\infty E^{1/2} \exp[-(E - E_f)/kT] dE \quad (6)$$

$$N_c \equiv 12 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \text{ for Si} \quad (7)$$

$$N_c \equiv 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \text{ for GaAs} \quad (8)$$

Jika kita misalkan $x = E/kT$, maka persamaan 6 menjadi

$$n = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_c \exp\left(\frac{E_f}{kT}\right) \int_0^\infty x^{1/2} e^{-x} dx \quad (9)$$

Integral dalam Persamaan 9 berbentuk standar dan sama dengan $\sqrt{\pi}/2$. Oleh karena itu, Persamaan 9 menjadi

$$n = N_c \exp(E_f/kT) \quad (10)$$

Jika kita merujuk ke dasar pita konduksi sebagai E_c bukannya $E = 0$, kita memperoleh kerapatan elektron di pita konduksi

$$n = N_c \exp[-(E_c - E_f)/kT] \quad (11)$$

di mana N_c yang didefinisikan dalam Persamaan 8 adalah kerapatan efektif keadaan dalam pita konduksi. Pada suhu ruangan (300 K), N_c adalah $2,86 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ untuk silikon dan $4,7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ untuk galium arsenida. Demikian pula, kita dapat memperoleh kerapatan lubang p dalam pita valensi:

$$p = N_v \exp[-(E_f - E_v)/kT] \quad (12)$$

Dan

$$N_v = 2 (2\pi m_p kT/h^2)^{3/2} \quad (13)$$

di mana N_v adalah kerapatan efektif keadaan pada pita valensi untuk Si dan GaAs. Untuk silikon, N_v adalah $2,66 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ dan untuk galium arsenida, N_v adalah $7,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Jumlah elektron per satuan volume pada pita konduksi sama dengan jumlah lubang

per satuan volume pada pita valensi untuk semikonduktor intrinsik, sehingga $n = p = n_i$, di mana n adalah kerapatan pembawa intrinsik. Gambar 7d menunjukkan hubungan antara elektron dan lubang ini. Perhatikan bahwa area yang diarsir pada pita konduksi sama dengan area yang diarsir pada pita valensi.

Persamaan 11 dan 12 dapat disesuaikan untuk menghitung tingkat Fermi semikonduktor intrinsik sebagai berikut:

$$E_f = E_i = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right) \quad (14)$$

Pada suhu ruangan, suku kedua jauh lebih kecil daripada celah pita. Oleh karena itu, level Fermi intrinsik E_i dari semikonduktor intrinsik umumnya terletak sangat dekat dengan bagian tengah celah pita.

Kepadatan pembawa intrinsik diperoleh dari Persamaan 11, 12, dan 14:

$$np = n_i^2, \quad (15)$$

$$n_i^2 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (16)$$

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (17)$$

8.4.2 Semikonduktor ekstrinsik

Tingkat energi pengotor diperkenalkan ketika semikonduktor didoping oleh pengotor. Gambar 8a menunjukkan secara skematis bahwa atom arsenik, yang memiliki lima elektron valensi, menggantikan atau menggantikan atom silikon. Empat atom silikon yang berdekatan dengan atom arsenik membentuk ikatan kovalen. Pada suhu sedang, elektron kelima dapat "terionisasi" menjadi elektron konduksi karena memiliki energi pengikatan yang relatif kecil terhadap atom arsenik inangnya. Kami mengatakan bahwa elektron ini "disumbangkan" ke pita konduksi. Karena penambahan pembawa muatan negatif, atom arsenik disebut sebagai donor, dan silikon diklasifikasikan sebagai tipe-n. Dengan cara yang sama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8b, ketika atom silikon diganti dengan atom boron yang memiliki tiga elektron valensi, elektron tambahan "diterima" untuk membentuk empat ikatan kovalen di sekitar boron, yang menghasilkan "lubang" bermuatan

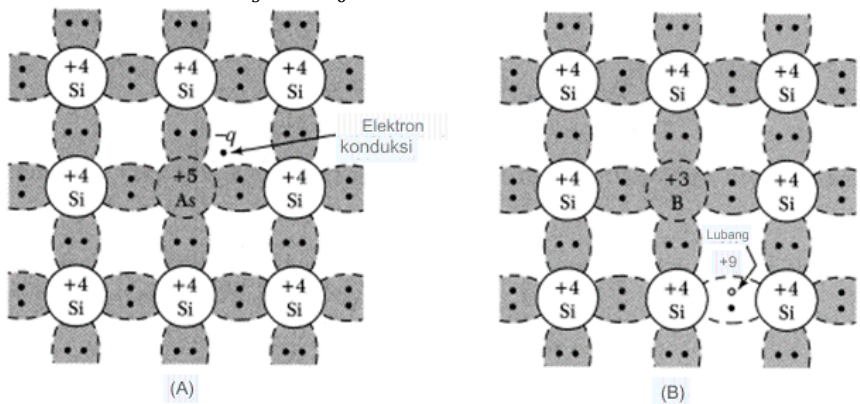
positif di pita valensi. Ini adalah semikonduktor tipe-p dengan akseptor boron.

Dalam model atom hidrogen, kita dapat menghitung energi ionisasi donor E_D dengan mengganti m_0 dengan massa efektif elektron m dan memperhitungkan permitivitas semikonduktor dalam model atom hidrogen.

$$E_h = -\frac{13,6}{n^2} eV \quad (18)$$

Maka diperoleh :

$$E_D = \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_s}\right)^2 \left(\frac{m_n}{m_0}\right) E_H \quad (19)$$

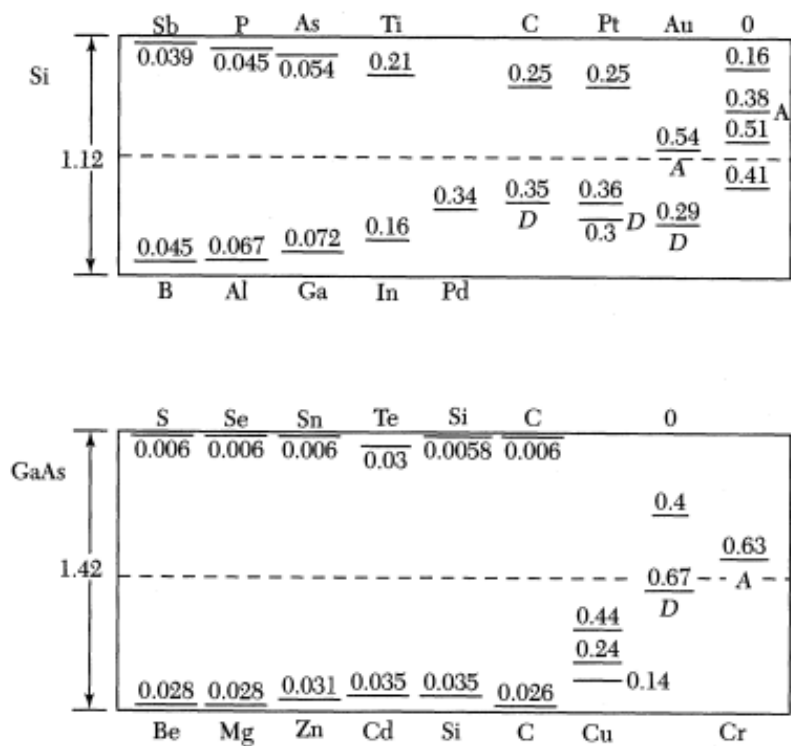


Gambar 8.7. Sekema ikatan untuk (a) Si tipe-n dengan donor (arsenik) dan (b) Si tipe-p dengan akseptor (boron). (Sze & Lee, 2012)

Menurut persamaan 23, energi ionisasi donor 0,025 eV untuk silikon dan 0,007 eV untuk galium arsenida, diukur dari tepi pita konduksi. Perhitungan tingkat ionisasi atom hidrogen untuk akseptor sebanding dengan perhitungan untuk donor. Energi ionisasi untuk silikon dan arsenida adalah 0,05 eV, dan pita valensi yang tidak terisi dianggap terisi dengan lubang di medan gaya pusat akseptor bermuatan negatif.

Tidak ada cara untuk model atom hidrogen sederhana ini menjelaskan energi ionisasi khusus, terutama untuk tingkat pengotor semikonduktor (yaitu, dengan energi ionisasi lebih dari 3 kT). Tetapi nilai yang dihitung menunjukkan urutan besaran energi ionisasi sebenarnya untuk tingkat pengotor dangkal. Gambar 8.8

menunjukkan energi ionisasi yang diukur untuk berbagai pengotor dalam galium arsenida dan silikon. Ingatlah bahwa satu atom dapat memiliki banyak tingkat. Ini terjadi dengan oksigen dalam silikon, yang memiliki dua tingkat donor dan akseptor dalam celah energi terlarang.



Gambar 8.8. Energi ionisasi terukur (dalam eV) untuk berbagai pengotor dalam Si dan GaAs. Kadar di bawah pusat celah diukur dari atas pita valensi dan merupakan kadar akseptor kecuali ditunjukkan oleh D untuk kadar donor. Kadar di atas pusat celah diukur dari bawah pita konduksi dan merupakan kadar donor kecuali ditunjukkan oleh A untuk kadar akseptor.(Sze & Lee, 2012)

Dalam diskusi sebelumnya, dianggap bahwa konsentrasi lubang atau elektron jauh lebih rendah daripada kerapatan efektif keadaan pada pita valensi atau pita konduksi. Dengan kata lain, level Fermi E_f setidaknya $3kT$ lebih besar dari E_v atau $3kT$ lebih rendah

dari E_c . Dalam hal ini, semikonduktor disebut semikonduktor nondegenerate.

Dalam silikon dan galium arsenida, donor dangkal biasanya memiliki energi termal yang cukup untuk menyediakan energi E_D untuk mengionisasi semua pengotor donor pada suhu ruangan, yang menghasilkan jumlah elektron yang sama dalam pita konduksi. Kondisi ini disebut ionisasi lengkap. Kerapatan elektron dalam kondisi ini dapat ditulis sebagai

$$n = N_D \quad (20)$$

dimana konsentrasi donor adalah N_D . Gambar 10a menunjukkan ionisasi lengkap, dengan E_D adalah tingkat donor yang diukur terhadap dasar pita konduksi dan konsentrasi elektron (bergerak) dan ion donor yang sama. Persamaan 11 dan 20 menunjukkan tingkat Fermi untuk kerapatan keadaan efektif N_c dan konsentrasi donor N_D :

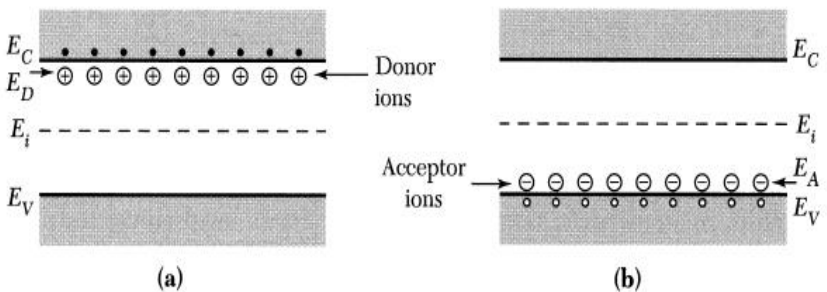
$$E_c - E_f = kT \ln \frac{N_c}{N_D} \quad (21)$$

Untuk akseptor dangkal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 25b, konsentrasi lubang akan menjadi jika terjadi ionisasi lengkap seperti pada persamaan berikut :

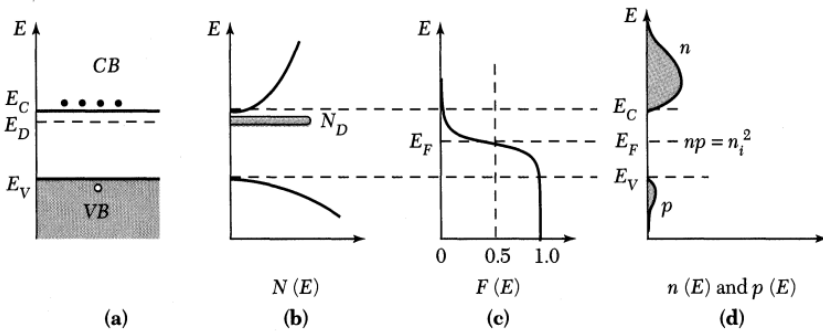
$$p = N_A \quad (22)$$

di mana konsentrasi akseptor adalah N_A . Persamaan 12 dan 22 dapat digunakan untuk mendapatkan tingkat Fermi yang sesuai.

$$E_f - E_v = kT \ln \frac{N_v}{N_A} \quad (23)$$



Gambar 8.9. Representasi pita energi skematik semikonduktor ekstrinsik dengan (a) ion donordan (b) ion akseptor



Gambar 8.10. Semikonduktor tipe n. (a) Diagram pita skematis. (b) Kepadatan keadaan. (c) Fungsi distribusi Fermi. (d) Konsentrasi pembawa. Perhatikan bahwa $np = n_i^2$

Persamaan 21 menunjukkan bahwa perbedaan energi $E_c - E_f$, berkorelasi negatif dengan konsentrasi donor; dengan kata lain, level Fermi akan bergerak mendekati ujung bawah pita konduksi, dan sebaliknya, dengan konsentrasi akseptor yang lebih besar, level Fermi akan bergerak mendekati ujung atas pita valensi. Gambar 11 menunjukkan cara mendapatkan konsentrasi pembawa, yang hampir sama dengan yang ditunjukkan pada Gambar 7. Namun, level Fermi lebih dekat ke ujung bawah pita konduksi, dan konsentrasi elektron, yang terlihat di area berbayang atas, jauh lebih besar daripada konsentrasi lubang, yang terlihat di area berbayang bawah.

Karena E sering digunakan sebagai tingkat referensi ketika membahas semikonduktor ekstrinsik, sangat membantu untuk menyatakan kerapatan elektron dan lubang dalam bentuk konsentrasi pembawa intrinsik n dan tingkat Fermi intrinsik E_i . Persamaan 11 menunjukkan bahwa :

$$\begin{aligned} n &= N_c \exp \left[-\frac{E_c - E_f}{kT} \right] \\ &= N_c \exp \left[-\frac{E_c - E_i}{kT} \right] \exp \left[\frac{E_f - E_i}{kT} \right] \end{aligned}$$

Atau

$$n = n_i \exp \left[\frac{E_f - E_i}{kT} \right] \quad (24)$$

dan serupa dengan itu,

$$p = n_i \exp \left[\frac{E_i - E_f}{kT} \right] \quad (25)$$

Perhatikan bahwa hasil perkalian n dan p dalam Persamaan 24 dan 25 sama dengan n^2 . Hasil ini identik dengan hasil perkalian dalam Persamaan 15, yang dikenal sebagai hukum aksi massa. Persamaan ini berlaku untuk semikonduktor intrinsik dan ekstrinsik ketika mereka berada di bawah konduksi kesetimbangan termal. Level Fermi bergerak ke arah dasar pita konduksi (tipe-n) atau ke atas pita valensi (tipe-p) dalam semikonduktor ekstrinsik. Pembawa tipe-n dan tipe-p akan dominan setelah itu, tetapi hasil perkalian keduanya akan tetap konstan pada suhu tertentu (Sze & Lee, 2012).

DAFTAR PUSTAKA

- Kuphaldt, T. R. (n.d.). *Lessons In Electric Circuits, Volume III -- Semiconductors*.
- Sze, S. M., & Lee, M.-K. (2012). *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. John Wiley & Sons.
- Yu, P. Y., & Cardona, M. (2010). Introduction. In P. Y. Yu & M. Cardona (Eds.), *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties* (pp. 1–15). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-00710-1_1

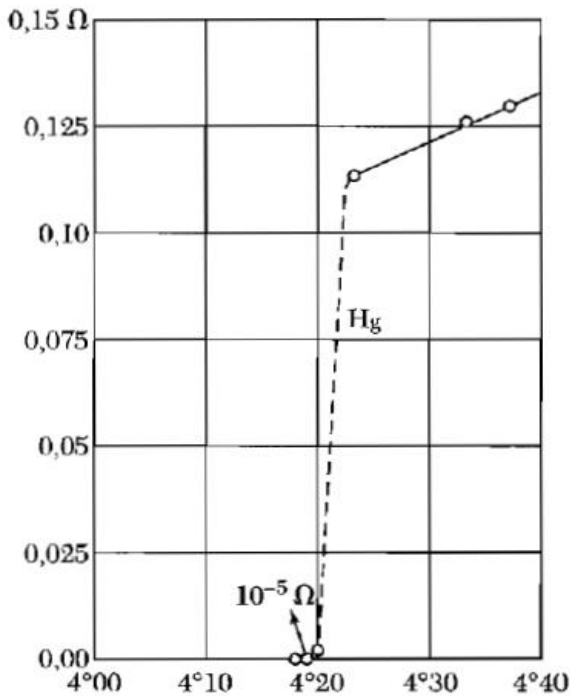
BAB 9

SUPERKONDUKTIVITAS

Oleh Nurul Fuadi

9.1 Pendahuluan

Superkonduktor adalah suatu material yang tidak memiliki hambatan dibawah suatu nilai suhu tertentu. Resistivitas listrik pada material (logam dan paduannya) menurun secara tiba-tiba menjadi nol ketika spesimen didinginkan hingga suhu yang cukup rendah yang disebut dengan suhu kritis, keadaan ini sering kali berada pada kisaran suhu helium cair ^4He . Kemampuan untuk mengalirkan arus listrik tanpa resistansi pada saat didinginkan di bawah suhu tertentu (T_c) dikenal sebagai superkonduktivitas. Pada temperatur kritis T_c specimen mengalami fase transisi dari keadaan resistivitas listrik normal ke keadaan superkonduktivitas. Fenomena superkonduktivitas pertama kali diamati oleh fisikawan Belanda, **Heike Kamerlingh Onnes** di Leiden pada tahun 1911, tiga tahun setelah helium cair pertama kali ditemukan. Plot resistansi dalam ohm specimen Helium terhadap suhu absolut ditunjukkan oleh Kamerling Onnes sebagai penanda penemuan superkoduktivitas diilustrasikan pada gambar 9.1.



Gambar 9.1. Resistansi dalam ohm spesimen merkuri dalam Helium cair terhadap suhu absolut
(Sumber : C. Kittle, 2005)

Superkonduktor akhir-akhir ini menjadi topik pembicaraan dan penelitian yang populer. Fenomena superkonduktivitas ini sangat menarik dalam fisika dan teknologi rekayasa, karena potensi aplikasinya yang luas dan sifat-sifatnya yang unik sehingga superkonduktor memiliki banyak aplikasi, termasuk dalam teknologi magnet, seperti dalam pembangkit energi, kereta maglev, dan perangkat medis seperti MRI.

9.1.1 Sejarah Penemuan Superkonduktivitas

Sejarah penemuan superkonduktivitas dimulai pada awal abad ke-20. Hal ini menunjukkan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi, serta dampaknya yang signifikan terhadap berbagai

bidang. Beberapa tonggak penting dalam perkembangan superkonduktivitas:

1. 1911 - Penemuan Awal

Superkonduktivitas pertama kali ditemukan oleh Heike Kamerlingh Onnes, seorang fisikawan Belanda, saat ia meneliti sifat listrik Merkuri pada suhu rendah. Ia menemukan bahwa resistansi listrik Merkuri tiba-tiba hilang (resistansi 0) saat didinginkan di bawah suhu 4,2 K (-269°C), yaitu suhu cair helium.

2. 1933 - Efek Meissner

Walther Meissner dan Robert Ochsenfeld menemukan bahwa superkonduktor dapat mengeluarkan medan magnet ketika berada dalam keadaan superkonduktif. Dengan kata lain jika benda didinginkan pada suhu yang sangat rendah maka benda akan memiliki medan magnet yang menolak magnet lain jika di dekatkan. Hal ini dikenal sebagai efek Meissner. Penemuan ini menunjukkan bahwa superkonduktor tidak hanya menghilangkan resistansi tetapi juga mempengaruhi medan magnet di sekitarnya.

3. 1950-an - Teori BCS

Pada tahun 1957, John Bardeen, Leon Cooper, dan Robert Schrieffer mengembangkan teori BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) yang menjelaskan mekanisme superkonduktivitas pada material superkonduktor. Teori ini menjelaskan bagaimana pasangan elektron (dikenal sebagai pasangan Cooper) dapat terbentuk dan mengalir tanpa resistansi.

4. 1960-an - Superkonduktor Tipe II

Penelitian lebih lanjut mengidentifikasi superkonduktor tipe II, yang memiliki kemampuan untuk mengizinkan medan magnet menembus ke dalam material pada tingkat tertentu. Hal memberi peluang bagi aplikasi praktis dalam teknologi magnet.

5. 1986 - Superkonduktor Suhu Tinggi

Penemuan superkonduktor suhu tinggi oleh Johann Georg Bednorz dan K. Alex Müller di IBM Zurich menjadi titik balik besar dalam bidang ini. Mereka menemukan material berbasis keramik yang dapat menjadi superkonduktor pada suhu di atas 30 K. Penemuan ini mengarah pada pengembangan berbagai material superkonduktor suhu tinggi lainnya.

6. 1990-an - selanjutnya

Sejak penemuan superkonduktor suhu tinggi, penelitian terus berlanjut untuk menemukan material baru dan memahami mekanisme di balik superkonduktivitas. Hal ini memberi peluang pada berbagai aplikasi dalam teknologi medis, transportasi dan penyimpanan energi. Penemuan terbaru tahun 1990-2000-an antara lain:

- a. Pada tahun 1991, A. F. Hebard, dkk, menemukan bahwa *fullerite* $K_3C_{60} = (K^+)_3C_{60}^{3-}$ menjadi superkonduktor di bawah suhu $T_c = 18$ K. Suhu kritis (T_c) dalam ruang ini didorong ke $T_c = 33$ K untuk Cs_2RbC_{60} pada tekanan lingkungan dan $T_c = 38$ K untuk Cs_3C_{60} di bawah tekanan tinggi.
- b. Pada tahun 1994, Maeno, dkk, menemukan superkonduktivitas dalam Sr_2RuO_4 dengan $T_c \approx 1.5$ K. struktur kisi (*perovskite*) sama dengan cuprat yang paling awal dipelajari, seperti doping La_2CuO_4 , tetapi tembaga diganti menjadi rutenium. Keadaan superkonduktor bersifat magnetik dan dianggap mirip dengan keadaan superfluida He-3. Tetapi superkonduktivitas dalam Sr_2RuO_4 tentu saja tidak bersifat konvensional.
- c. Pada tahun 2001, Nagamatsu dkk, melaporkan superkonduktivitas dalam MgB_2 dengan $T_c = 39$ K. T_c yang tinggi dan struktur kristal berlapis, mengingatkan pada cuprat memberikan harapan bahwa superkonduktivitas dalam MgB_2 adalah tidak konvensional.
- d. Pada tahun 2006 penemuan penting telah dimulai, Kamihara dkk, mengamati superkonduktivitas dengan

- T_c 4K di LaFePO, senyawa berlapis lainnya. Hasil yang diperoleh dengan penambahan bahan dasar Fe^{2+} ke daftar superkonduktor belum menampakkan hasil yang diharapkan pada T_c rendah.
- e. Pada tahun 2008, Kamihara dkk menemukan superkonduktivitas dengan $T_c \approx 26K$ di $LaFeAsO_{1-x}F_x$. Segera setelah itu, T_c maksimum di kelas *iron-pnictide* ditekan menjadi 55 K. Superkonduktivitas juga diamati di beberapa kelas bahan terkait, beberapa di antaranya tidak mengandung oksigen (misalnya, LiFeAs) dan beberapa dengan pnictogen (As) diganti dengan chalcogen (misalnya, FeSe). Bentuk struktur umumnya adalah data, lapisan Fe^{2+} persegi dengan *pnictogen* atau *chalcogen* ditempatkan bergantian di atas dan di bawah lapisan Fe. Superkonduktivitas dianggap tidak konvensional. Mekanismenya tidak tentunya sama untuk semua anggota keluarga yang beragam ini
 - f. Pada tahun 2015, Drozdov dkk. melaporkan superkonduktivitas pada H_3S di bawah tekanan tinggi dengan suhu kritis maksimum $T_c = 203K$ dan pada tahun 2019 menemukan LaH_{10} di bawah tekanan tinggi dengan $T_c \approx 250K$, seperti disebutkan di atas. Superkonduktivitas diperkirakan konvensional disebabkan oleh aktivitas fonon.

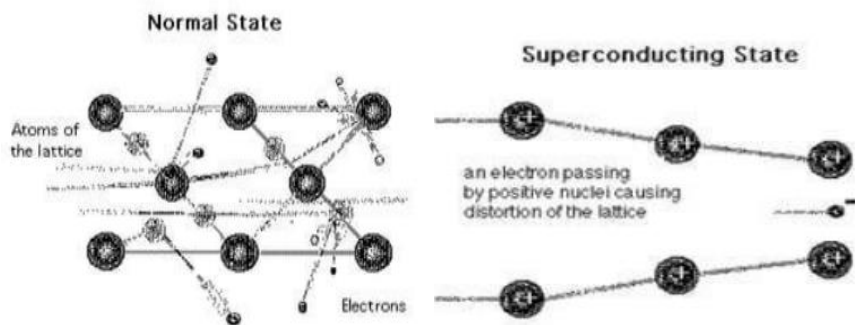
9.2 Karakteristik Superkonduktivitas

Superkonduktor memiliki sejumlah karakteristik unik yang membedakannya dari material konduktor biasa. Karakteristik-karakteristik ini berkaitan dengan kemampuan superkonduktor untuk menghantarkan arus listrik tanpa hambatan dan responsnya terhadap medan magnet.

9.2.1 Sifat kelistrikan Superkonduktor

Sebelumnya kita jelaskan dulu prinsip kerja logam konduktor secara umum. Bahan logam terdiri atas kisi-kisi, basis dan elektron bebas. Ketika diberikan medan listrik maka dengan cepat akan menghamburkan elektron kesegala arah dan menumbuk atom pada kisi. Sehingga timbul resistansi, pada logam konduktor.

Pada bahan superkonduktor juga terjadi interaksi antara elektron dan inti atom. Namun elektron ini dapat melewati inti tanpa mengalami hambatan dari atom kisi. Ketika elektron melewati kisi, maka inti yang bermuatan positif akan menarik elektron yang bermuatan negatif sehingga mengakibatkan elektron mengalami getaran.



Gambar 9.2. (a) Keadaan normal atom kisi pada logam. (b) Keadaan superkonduktor atom kisi pada logam
(sumber:<https://sainsmini.blogspot.com/2015/08/sejarah-superkonduktor-teori-dan-sifat.html>)

Suhu Kritis (T_c)

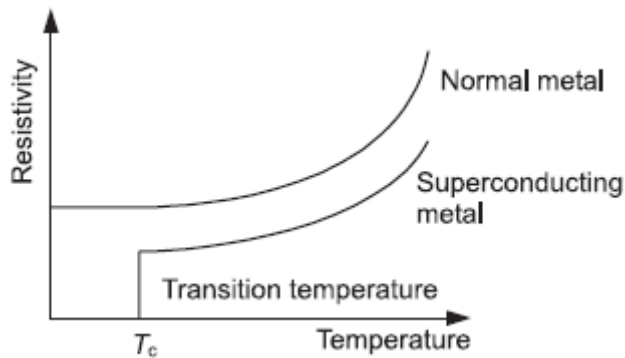
Setiap superkonduktor memiliki suhu kritis tertentu, dimana material tersebut beralih dari keadaan normal menjadi keadaan superkonduktif. Suhu kritis ini dapat bervariasi dari beberapa kelvin (K) hingga lebih dari 100 K untuk superkonduktor suhu tinggi. Di atas suhu ini, material tersebut kembali menjadi konduktor biasa dan kehilangan sifat superkonduktivitasnya. Superkonduktor dapat dibagi menjadi dua kategori berdasarkan suhu kritisnya:

1. Superkonduktor suhu rendah
Biasanya bekerja pada suhu mendekati nol absolut (0 K), seperti logam murni (misalnya, timah, aluminium).
2. Superkonduktor suhu tinggi
Bahan keramik dan senyawa oksida, seperti YBCO (*Yttrium Barium Copper Oxide*), yang memiliki suhu kritis jauh di atas suhu helium cair dan bisa mendekati suhu nitrogen cair.

Resistivitas Nol (*Zero Resistance*)

Salah satu sifat paling penting dari superkonduktor adalah resistivitas nol. Hal ini terjadi karena adanya gaya tarik menarik antar elektron yang diakibatkan adanya pertukaran fonon tadi. Resistansi listrik superkonduktor benar-benar hilang ketika suhunya diturunkan di bawah suhu kritisnya (T_c), yaitu suhu di mana material tersebut memasuki fase superkonduktivitas. Arus listrik bisa mengalir tanpa hambatan, yang berarti tidak ada energi yang hilang sebagai panas.

Di bawah suhu kritis, resistivitas listrik superkonduktor benar-benar menghilang, memungkinkan arus listrik mengalir tanpa kehilangan energi akibat panas atau gesekan. Arus listrik dalam superkonduktor bisa terus mengalir tanpa gangguan selama periode waktu yang sangat lama tanpa kehilangan daya. Fenomena ini memungkinkan pengiriman arus listrik tanpa kehilangan energi dalam bentuk panas, yang tidak mungkin terjadi dalam konduktor biasa seperti tembaga.



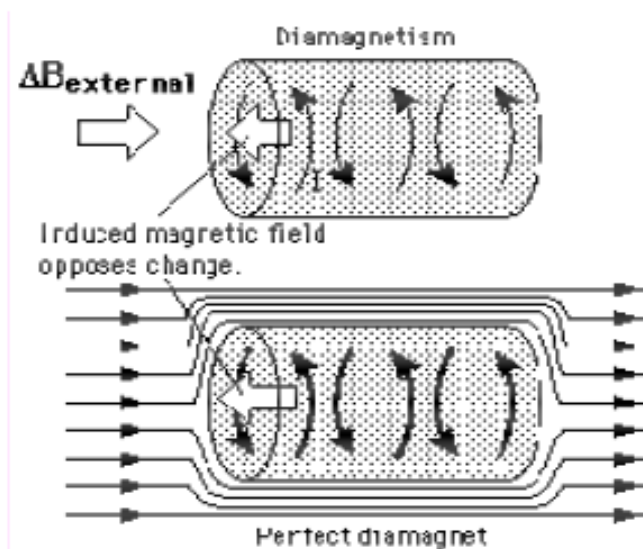
Gambar 9.3. Resistivitas listrik pada logam pada keadaan normal dan superkonduktor
(sumber : C. Kittel, 2005)

Hal ini menjadi perbedaan besar pada superkonduktor dibandingkan konduktor biasa, di mana arus listrik selalu menghadapi resistansi yang menyebabkan energi hilang sebagai panas. Resistansi nol memungkinkan superkonduktor digunakan

dalam aplikasi yang membutuhkan efisiensi tinggi dalam transmisi energi, seperti dalam jaringan listrik dan perangkat penyimpanan energi.

9.2.2 Sifat Kemagnetan Superkonduktor dan Efek Meissner

Sifat lain dari superkonduktor yaitu bersifat diamagnetis sempurna. Jika sebuah superkonduktor ditempatkan pada medan magnet, maka tidak akan ada medan magnet dalam superkonduktor. Hal ini terjadi karena superkonduktor menghasilkan medan magnet dalam bahan yang berlawanan arah dengan medan magnet luar yang diberikan. Efek yang sama dapat diamati jika medan magnet diberikan pada bahan dalam suhu normal kemudian didinginkan sampai menjadi superkonduktor. Pada suhu kritis, medan magnet akan ditolak..

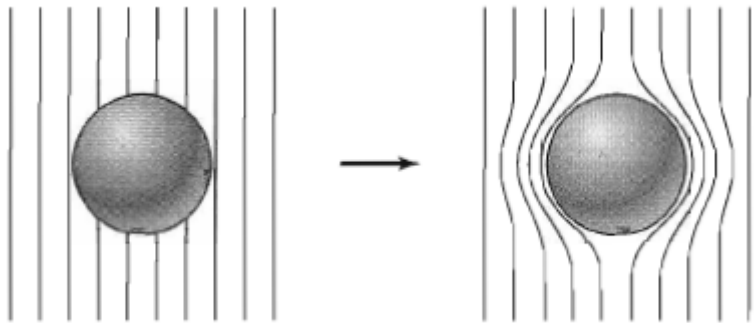


Gambar 9.4. Diamagnetis sempurna pada superkonduktor
(sumber: <https://sainsmini.blogspot.com/2015/08/sejarah-superkonduktor-teori-dan-sifat-sifatnya.html>)

Fakta eksperimen menyatakan bahwa superkonduktor bulk dalam medan magnet yang lemah akan bertindak sebagai diamagnetis sempurna, dengan induksi magnetik nol di bagian

dalam. Ketika sebuah spesimen ditempatkan dalam medan magnet dan kemudian didinginkan melalui suhu transisi untuk superkonduktivitas, fluks magnetik yang awalnya ada dikeluarkan dari spesimen. Sifat magnetik superkonduktor yang unik adalah pusat dari karakterisasi keadaan superkonduktor. Keadaan superkonduktor merupakan keadaan teratur dari elektron konduksi logam. Urutannya adalah dalam pembentukan pasangan elektron yang terkait secara longgar. Elektron-elektron tersebut tersusun pada suhu di bawah suhu transisi, dan tidak teratur di atas suhu transisi. Sifat dan asal mula keteraturan ini dijelaskan lebih lanjut oleh Bardeen, Cooper, dan Schrieffer.

Suatu material memiliki kemampuan untuk mengalirkan arus listrik tanpa resistansi pada saat didinginkan di bawah suhu tertentu (T_c) fenomena ini dikenal superkonduktivitas. Pada suhu ini, superkonduktor tidak hanya menghilangkan resistansi, tetapi juga dapat menolak medan magnet. Superkonduktor mengusir semua medan magnet dari inti ketika dalam keadaan superkonduksi. Fenomena ini dikenal sebagai Efek Meissner.



Gambar 9.5. Efek Meissner dalam bola superkonduktor yang didinginkan dalam medan magnet yang diterapkan secara konstan; pada saat melewati di bawah suhu transisi, garis-garis induksi B dikeluarkan dari bola.

(sumber : Kittle, C. 2005)

Ketika medan magnet eksternal diterapkan pada superkonduktor, medan tersebut tidak dapat menembus material superkonduktor (sampai batas medan kritis), menyebabkan medan

magnet hanya berada di permukaan. Hal ini menyebabkan superkonduktor dapat levitasi di atas medan magnet, yang dimanfaatkan dalam teknologi seperti kereta maglev. Levitasi magnet pada superkonduktor merupakan hasil dari interaksi unik antara medan magnet eksternal dan sifat superkonduktor yang menolak atau mengunci medan magnet, sehingga menciptakan efek levitasi yang stabil tanpa kontak fisik. Superkonduktor dapat menghasilkan fenomena levitasi magnetik, di mana magnet dapat melayang di atas permukaan superkonduktor (atau sebaliknya) karena adanya penolakan medan magnet (Efek Meissner) dan stabilitas yang diberikan oleh fluks kuantum.

9.2.3 Medan Kritis

Superkonduktor juga memiliki batas medan magnet tertentu yang disebut medan kritis. Jika medan magnet yang diterapkan pada material superkonduktor melebihi medan kritis ini, material akan kehilangan sifat superkonduktivitasnya. Ada dua tipe superkonduktor berdasarkan responnya terhadap medan magnet:

1. Superkonduktor tipe I:

Superkonduktor tipe I adalah material yang menunjukkan sifat superkonduktivitas hanya hingga medan magnet tertentu. Di bawah medan magnet kritis (H_c), material akan benar-benar mengusir medan magnet dari dalam, dan jika medan magnet melebihi H_c , material akan kehilangan sifat superkonduktivitasnya. Karakteristik superkonduktor tipe I yaitu medan magnet dikeluarkan sepenuhnya dari superkonduktor di bawah medan kritis (H_c) hingga superkonduktivitas menghilang secara mendadak setelah medan melebihi H_c . Material ini memiliki satu medan kritis dan sepenuhnya mengusir medan magnet (*Efek Meissner*) hingga medan tersebut melebihi batas kritis, yang menyebabkan material kembali ke keadaan normal. Superkonduktor tipe I biasanya ditemukan pada unsur-unsur murni seperti timah (Sn) atau timbal (Pb).

Persamaan Medan Kritis diberikan oleh:

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (9.1)$$

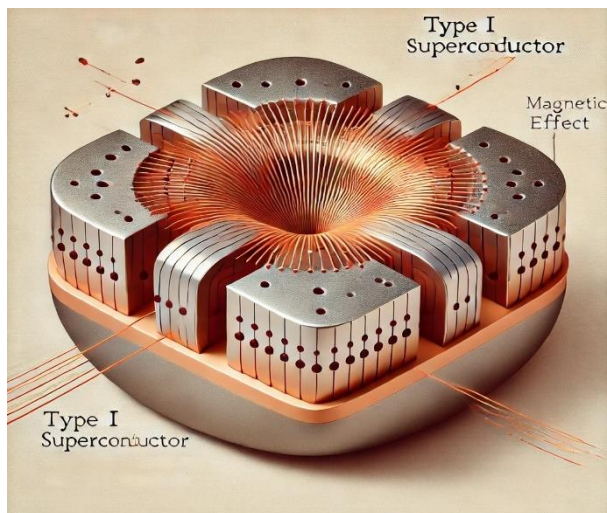
Di mana:

$H_c(T)$ adalah medan kritis pada suhu T (A/m)

$H_c(0)$ adalah medan kritis pada suhu nol absolut (A/m)

T adalah suhu saat ini (K)

T_c adalah suhu kritis (K)



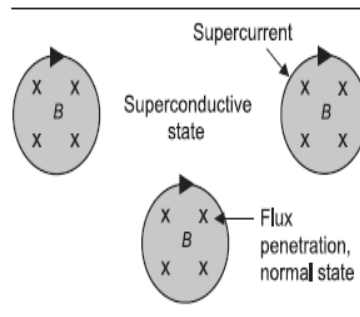
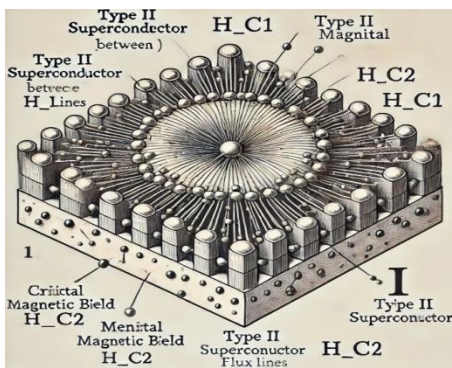
Gambar 9.6. Superkonduktir tipe 1 dimana medan magnet sepenuhnya diusir dari material superkonduktor, memperlihatkan Efek Meissner khas tipe I.

(Sumber:https://common.wikimedia.org/wiki/file:type_i_and_type_ii_superconductors.svg)

2. Superkonduktor Tipe II

Superkonduktor tipe II memiliki dua nilai medan kritis, yaitu medan kritis bawah (H_{c1}) dan medan kritis atas (H_{c2}). Pada dasarnya superkonduktor tipe II memiliki dua medan kritis, dan medan magnet bisa menembus material dalam bentuk "*flux vortices*" antara kedua medan kritis tersebut, tetapi material tetap dalam keadaan superkonduktor. Karakteristik

Superkonduktor tipe II yaitu di bawah medan kritis pertama (H_{c1}), medan magnet sepenuhnya dikeluarkan (Efek Meissner). Antara H_{c1} dan H_{c2} , medan magnet menembus material dalam bentuk garis vorteks, yang memungkinkan beberapa penetrasi medan tetapi superkonduktivitas tetap ada. Di atas H_{c2} , superkonduktivitas menghilang dan material berperilaku seperti konduktor biasa. Contoh superkonduktor tipe II termasuk paduan seperti Niobium-Titanium (NbTi) dan keramik oksida cuprate.



Gambar 9.7. Superkonduktor tipe II, Dimana sebagian medan magnet menembus material dalam bentuk vorteks antara medan kritis pertama (H_{c1} dan medan kritis kedua (H_{c2}).

(Sumber: <https://sainsmini.blogspot.com/2015/08/sejarah-superkonduktor-teori-dan-sifat-sifatnya.html>)

Nilai medan kritis sangat bervariasi tergantung pada jenis superkonduktor:

1. Superkonduktor Tipe I biasanya memiliki medan kritis yang relatif rendah, seringkali sekitar beberapa ratus hingga beberapa ribu ampere per meter (A/m).
2. Superkonduktor Tipe II, terutama superkonduktor suhu tinggi, dapat memiliki medan kritis kedua yang sangat tinggi, hingga beberapa juta ampere per meter (A/m).

9.2.4 Tegangan Kritis dan Arus Kritis

Selain suhu dan medan magnet, superkonduktor juga memiliki tegangan kritis dan arus kritis. Jika tegangan atau arus yang dialirkan melebihi nilai kritis, superkonduktor akan kehilangan sifat superkonduktivitasnya dan kembali menjadi konduktor biasa.

9.2.5 Kuantisasi Fluks Magnetik

Di dalam keadaan campuran, vorteks atau garis-garis fluks terbentuk di dalam material. Setiap vorteks membawa satu kuanta fluks dan vorteks ini dikelilingi oleh arus superkonduktif yang menjaga medan magnet tetap berada dalam vorteks tersebut. Fluks magnetik yang melewati material kuantum dalam satuan yang disebut fluks kuantum (yang merupakan nilai terkecil dari fluks magnetik yang bisa ada dalam material superkonduktor).

$$\Phi_0 = h/2e \quad 9.2$$

Dimana:

h adalah konstanta planck ($6,62 \times 10^{-34}$ J.s.

e adalah muatan elektron ($1,602 \times 10^{-19}$ C

Fenomena ini berperan penting dalam efek Josephson, di mana dua superkonduktor yang dipisahkan oleh lapisan isolator tipis memungkinkan arus superkonduktor untuk menembus lapisan tersebut dengan cara kuantum.

9.2.6 Efek Josephson

Jika dua superkonduktor dipisahkan oleh penghalang isolator tipis, elektron dapat "menembus" melalui penghalang tersebut dalam bentuk arus tanpa tegangan, fenomena yang dikenal sebagai *efek Josephson*. Efek ini digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti dalam SQUID (*Superconducting Quantum Interference Devices*) yang digunakan untuk mendeteksi medan magnet yang sangat lemah, serta dalam pembuatan elemen-elemen dasar komputer kuantum.

9.3 Teori-teori superkonduktivitas

9.3.1 Pembentukan Pasangan Cooper (*Cooper Pairs*)

Ketika terdapat dua buah elektron melewati kisi kristal, maka elektron kedua akan mendekati elektron pertama disebabkan adanya gaya tarik menarik dari inti atom kisi yang lebih besar. Gaya yang timbul melebihi gaya tolak menolak antar elektron sehingga kedua elektron akan bergerak berpasangan. Pasangan inilah yang dikenal *Cooper Pairs*. Pada saat elektron pasangan cooper melewati inti atom kisi, maka elektron bergetar mendekati inti atom kisi dan memancarkan fonon. Sementara elektron lainnya menyerap fonon.

Dalam superkonduktor pada suhu rendah, elektron-elektron dengan momentum yang berlawanan (gerak tolak menolak) dapat membentuk pasangan melalui interaksi yang menimbulkan terciptanya fonon, hal ini dikenal sebagai pasangan Cooper (*Cooper Pairs*). Pasangan Cooper ini bergerak tanpa hambatan melalui kisi kristal material, sehingga tidak ada hambatan listrik. Fenomena ini dijelaskan oleh teori BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer), yang menjelaskan bagaimana interaksi antara elektron dan getaran kisi (fonon) menghasilkan pembentukan pasangan Cooper.

Superkonduktivitas terjadi karena pembentukan pasangan Cooper dan kondensasi kuantum dari pasangan-pasangan ini ke dalam keadaan energi terendah. Pasangan cooper terjadi ketika elektron-elektron dengan momentum dan spin yang berlawanan membentuk pasangan Cooper. Pasangan ini bergerak melalui material tanpa mengalami hambatan. Kondensasi Kuantum terjadi ketika pasangan Cooper bertindak seperti boson dan dapat memasuki keadaan kondensasi kuantum pada suhu di bawah suhu kritis, di mana semua pasangan bergerak secara kolektif tanpa kehilangan energi. Interaksi elektron dengan fonon dalam kisi kristal menyebabkan distorsi yang memungkinkan elektron lain mendekati elektron pertama, meskipun mereka memiliki muatan yang sama, yang dapat mengatasi gaya tolak Coulomb antara elektron. Kemudian timbul energi gab dalam spektrum energi yang memutus pasangan Cooper dan mengembalikan sistem ke keadaan resistif, diperlukan energi tambahan. Untuk mendeskripsikan energi

yang dibutuhkan untuk memutus pasangan Cooper, persamaan diberikan persamaan energi gab:

$$\Delta E = 2\Delta(T) \quad 9.3$$

di mana $\Delta(T)$ adalah celah energi yang bergantung pada suhu T , dan ΔE adalah energi yang diperlukan untuk memisahkan pasangan Cooper menjadi elektron-elektron individu.

Jadi mekanisme pembentukan pasangan cooper terjadi ketika sebuah elektron bergerak melalui kisi kristal, ia dapat mendistorsi kisi tersebut, menciptakan getaran yang dikenal sebagai fonon. Kemudian fonon ini menciptakan potensi kecil yang bisa menarik elektron kedua, menyebabkan keduanya membentuk pasangan dengan momentum total nol. Pasangan Cooper bergerak bersama melalui material tanpa mengalami hambatan, sehingga bisa mengantarkan listrik tanpa kehilangan energinya.

Momentum total pasangan Cooper adalah nol:

$$k_1 + k_2 = 0 \quad 9.4$$

di mana k_1 dan k_2 adalah vektor momentum dari dua elektron yang membentuk pasangan.

9.3.2 Teori BCS (*Bardeen-Cooper-Schrieffer*)

Teori dasar Quantum untuk superkonduktor dirumuskan melalui tulisan Bardeen, Cooper dan Schrieffer pada tahun 1957. Teori ini dinamakan teori BCS. Fungsi gelombang BCS menyusun pasangan partikel dan merupakan teori mikroskopis pertama yang berhasil menjelaskan fenomena superkonduktivitas dalam bahan logam konvensional. Teori BCS menjelaskan bahwa :

1. Interaksi tarik menarik antara elektron dapat menyebabkan keadaan dasar terpisah dengan keadaan tereksitasi oleh energi gap.
2. Interaksi antara elektron, elektron dan kisi menyebabkan adanya energi gap yang diamati. Mekanisme interaksi yang

tidak langsung ini terjadi ketika satu elektron berinteraksi dengan kisi dan merusaknya. Elektron kedua memanfaatkan keuntungan dari deformasi kisi. Kedua elektron ini berinteraksi melalui deformasi kisi.

3. London Penetration Depth merupakan konsekuensi dari Teori BCS.

Teori BCS Keadaan superkonduktor suatu logam bisa dipandang sebagai hasil perilaku bersama elektron-elektron konduksi. Kerjasama atau koherensi elektron-elektron terjadi bila sejumlah elektron menempati keadaan kuantum yang sama. Namun demikian, hal ini tampaknya tidak mungkin menurut penalaran statistik dan dinamik. Secara statistik, elektron-elektron adalah fermion-fermion, sehingga menempati keadaan-keadaan kuantum tunggal. Gagasan utama teori ini adalah bahwa superkonduktivitas terjadi karena interaksi antara elektron-elektron dalam suatu logam melalui getaran kisi kristal (fonon). Superkonduktor berperilaku seperti partikel independen yang tolak menolak karena muatan negatifnya, pada suhu rendah, elektron dapat membentuk pasangan Cooper melalui interaksi tak langsung dengan getaran kisi.

Prinsip-prinsip dasar Teori BCS:

1. Pembentukan Pasangan Cooper.
Elektron-elektron berpasangan dengan jarak yang relatif jauh (puluhan hingga ratusan nanometer), dan mereka berperilaku sebagai satu entitas kuantum yang memiliki momentum total nol.
2. Kondensasi Bose-Einstein.
Pasangan Cooper ini dapat dianggap sebagai boson, sehingga mereka bisa mengalami kondensasi Bose-Einstein. Dalam keadaan kondensasi ini, semua pasangan Cooper bergerak bersama tanpa hambatan, menyebabkan resistansi nol.
3. Energi Celah (*Energy Gap*).
Teori BCS memprediksi adanya energi celah di spektrum energi elektron dalam superkonduktor. Ini berarti ada energi minimum yang dibutuhkan untuk memutus

pasangan Cooper dan mengembalikan sistem ke keadaan normal. Celah energi ini bertanggung jawab atas resistansi nol di bawah suhu kritis.

Salah satu persamaan inti dari teori BCS menggambarkan hubungan antara suhu kritis (T_c) dan energi celah (Δ) sebagai berikut:

$$\Delta(T = 0) \approx 1,76 k_B T_c \quad 9.5$$

di mana $\Delta(T=0)$ adalah celah energi pada suhu nol, k_B adalah konstanta Boltzmann, dan T_c adalah suhu kritis. Persamaan ini menunjukkan bahwa celah energi terkait erat dengan suhu kritis superkonduktor.

9.3.3 Teori Ginzburg-Landau

Teori Ginzburg-Landau adalah teori fenomenologis yang dikembangkan oleh Vitaly Ginzburg dan Lev Landau pada tahun 1950, sebelum teori BCS, dan menjelaskan sifat makroskopis superkonduktor dengan menggunakan pendekatan medan orde parameter. Teori Ginzburg-Landau tidak memberikan gambaran mikroskopis tentang bagaimana superkonduktivitas terjadi, tetapi sangat efektif dalam memodelkan sifat-sifat superkonduktor di sekitar suhu kritis.

Prinsip Teori Ginzburg-Landau:

Teori Ginzburg-Landau memperkenalkan parameter orde kuantum (ψ) yang menggambarkan keadaan superkonduktor. Nilai absolut dari ψ mencerminkan densitas pasangan Cooper dalam superkonduktor, bentuk energi bebas yang bergantung pada ψ , serta medan magnet dan listrik. Energi bebas ini dapat digunakan untuk menjelaskan transisi dari keadaan superkonduktor ke keadaan normal saat suhu atau medan magnet berubah.

Fungsional Energi bebas Ginzburg-Landau:

$$G(\psi, A) = \int_v \left[\alpha(T) |\psi(\mathbf{r})|^2 + \frac{1}{2} \beta(T) |\psi(\mathbf{r})|^4 + \frac{1}{2m} |[-i\hbar\nabla - 2e\mathbf{A}(\mathbf{r})]\psi(\mathbf{r})|^2 + \frac{1}{2\mu_0} |B(\mathbf{r}) - \mu_0 \mathbf{H}|^2 \right] dV$$

11.6

Dengan meminimasi Energi gabs Ginzburg-Landau terhadap ψ dan $\mathbf{A}$ menghasilkan :

$$\alpha(T)\psi(r) + \beta(T)|\psi(r)|^2\psi(r) + \frac{1}{2m}[-i\hbar\nabla - 2e\mathbf{A}(\mathbf{r})]^2\psi(r) = 0 \quad 9.7$$

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = \frac{e\hbar}{im} [\psi^*(\mathbf{r})\nabla\psi(\mathbf{r}) - \psi(\mathbf{r})\nabla\psi^*(\mathbf{r})] - \frac{4e^2}{m}\psi^*(\mathbf{r})\psi(\mathbf{r})\mathbf{A}(\mathbf{r}) \quad 9.8$$

Dengan syarat batas

$$[-i\hbar\nabla - 2e\mathbf{A}(\mathbf{r})|\psi(\mathbf{r})|_n = 0 \quad \text{tanpa efek proksimitas}$$

$$[-i\hbar\nabla - 2e\mathbf{A}(\mathbf{r})|\psi(\mathbf{r})|_n = \frac{i\hbar}{b} \psi(\mathbf{r}) \quad \text{ada efek proksimitas}$$

selanjutnya dari teori Ginzburg-Landau didapatkan definisi

$$\text{➤ Panjang koherensi: } \xi(T) = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m|\alpha(T)|}} \quad 9.9$$

$$\text{➤ Panjang penetrasi London: } \lambda(T) = \sqrt{\frac{m\beta}{4\mu_0 e^2 |\alpha(T)|^2}} \quad 9.10$$

$$\text{➤ Parameter Ginzburg-Landau: } \kappa = \frac{\lambda(T)}{\xi(T)} = \sqrt{\frac{m^2 \beta}{\mu_0 e^2 \hbar^2}} \quad 9.11$$

Teori Ginzburg-Landau menjelaskan fenomena makroskopis superkonduktor, seperti panjang koherensi dan panjang penetrasi medan magnet. Selain itu, teori ini juga digunakan untuk menjelaskan perbedaan antara superkonduktor tipe I dan superkonduktor tipe II.

9.4 Superkonduktor Suhu Tinggi (*High-Temperature Superconductors*)

Superkonduktor suhu tinggi adalah material yang menunjukkan sifat superkonduktivitas pada suhu jauh lebih tinggi dibandingkan superkonduktor konvensional. Material ini umumnya merupakan keramik oksida (cuprate) dan memiliki suhu kritis (T_c) atas 77 K (suhu nitrogen cair). Superkonduktor suhu tinggi memiliki karakteristik seperti YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) memiliki suhu kritis sekitar 92 K, yang jauh lebih tinggi daripada superkonduktor konvensional seperti timah atau niobium. Material ini merupakan superkonduktor tipe II, yang menunjukkan dua medan kritis dan memungkinkan penetrasi vorteks magnetik. Sejauh ini superkonduktor pada suhu tinggi belum ada teori lengkap yang menjelaskan mekanisme superkonduktivitasnya, berbeda dengan superkonduktor konvensional yang dijelaskan oleh teori BCS, sehingga superkonduktor suhu tinggi masih terus menjadi pengembangan topik penelitian.

Suhu tinggi menunjukkan superkonduktivitas pada bahan, terutama oksida tembaga, dengan suhu transisi yang tinggi, disertai dengan arus kritis dan medan magnet yang tinggi. Pada tahun 1988, batas suhu 23 K yang telah lama bertahan, dalam senyawa intermetalik telah dinaikkan menjadi 125 K dalam oksida superkonduktor bulk; hal ini lulus uji standar untuk superkonduktivitas-efek Meissner, efek ac Josephson, arus persisten dengan durasi panjang, dan resistivitas dc nol secara substansial. Beberapa material pada superkonduktor suhu tinggi:

$\text{BaPb}_{0.75}\text{Bi}_{0.25}\text{O}_3$	$T_c = 12 \text{ K}$	[BPBO]
$\text{La}_{1.85}\text{Ba}_{0.15}\text{CuO}_4$	$T_c = 36 \text{ K}$	[LBCO]
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	$T_c = 90 \text{ K}$	[YBCO]
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_{10}$	$T_c = 120 \text{ K}$	[TBCO]
$\text{Hg}_{0.8}\text{Tl}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.33}$	$T_c = 138 \text{ K}$	

Tabel 9.1. Perbandingan Karakteristik Superkonduktor

Karakteristik	Tipe I	Tipe 2	Suhu tinggi	Suhu rendah
Medan Kritis	Satu H_c	Dua H_c (H_{c1} dan H_{c2})	Biasanya dua H_c (H_{c2} tinggi)	Satu atau dua H_c
Efek Meissner	Total	Campuran (Meissner dan <i>Vorteks</i>)	Tergantung tipe	Tergantung tipe
Material	Logam Murni (Sn, Hg,Pb)	Paduan/senyawa (Nb-Ti, YBOC)	Keramik/Oksida	Logam/Paduan
Suhu Kritis (T_c)	Relatif rendah(<10 K)	Lebih tinggi	>30K (beberapa >100K)	<30 K
Pendinginan	Helium cair	Helium cair atau Nitrogen cair	Nitrogen cair	Helium cair

9.5 Aplikasi Superkonduktor

Superkonduktor memiliki sifat-sifat unik yang menjadikannya material dengan potensi besar dalam pengaplikasiannya, termasuk penghantaran listrik tanpa resistansi, perangkat magnetik kuat, dan komputasi kuantum. Tantangan terbesarnya adalah pengembangan material superkonduktor dengan suhu kritis yang lebih tinggi agar lebih mudah diimplementasikan dalam teknologi sehari-hari. Beberapa aplikasi superkonduktor:

1. Teknologi dalam Elektronik
 - a. Penghantaran Arus Tanpa Hambatan
Superkonduktor dapat menghantarkan listrik tanpa resistansi, sehingga tidak ada energi yang hilang sebagai panas berpotensi dalam membuat sistem penghantaran listrik yang lebih efisien.

- b. Quantum Computing
Superkonduktor dikembangkan dalam komputer kuantum, terutama dalam pembuatan qubit superkonduktor yang stabil dan lebih mudah dikendalikan.
 - c. Magnet Superkonduktor
Superkonduktor digunakan dalam menciptakan medan magnet yang sangat kuat dan stabil, misalnya dalam *Magnetic Resonance Imaging* (MRI) untuk diagnosis medis dan akselerator partikel seperti di CERN.
2. Efisiensi Energi
- a. Kawat Superkonduktor untuk Jaringan Listrik
Superkonduktor digunakan pada jaringan listrik yang hemat energi, karena tidak ada energi yang hilang sebagai panas selama transmisi listrik.
 - b. Motor dan Generator Superkonduktor
Superkonduktor berpotensi meningkatkan efisiensi motor dan generator, yang dapat berkontribusi terhadap pengurangan konsumsi energi global.
3. Pengembangan Transportasi Modern
- Superkonduktor digunakan dalam kereta levitasi magnetik (maglev) yang melayang di atas rel dengan bantuan medan magnet. Hal ini mengurangi gesekan pada rel, memungkinkan kereta berjalan dengan kecepatan sangat tinggi serta konsumsi energi lebih efisien.
4. Material Superkonduktor Suhu Tinggi
- Superkonduktor dibuat lebih praktis dan terjangkau untuk digunakan secara luas dalam berbagai teknologi. Superkonduktor suhu tinggi bisa bekerja pada temperatur mendekati suhu kamar memungkinkan aplikasi superkonduktor tanpa memerlukan pendinginan ekstrem
5. Detektor Sensitif dan Sensor
- Superkonduktor memungkinkan pembuatan sensor yang sangat sensitif terhadap medan magnet kecil, seperti SQUIDS (*Superconducting Quantum Interference Devices*), yang digunakan dalam penelitian ilmiah, geofisika, dan kedokteran.

6. Akselerator Partikel dan Fusi Nuklir

Dalam fisika partikel, superkonduktor digunakan untuk menciptakan medan magnet kuat yang diperlukan untuk memandu dan mempercepat partikel bermuatan. Dalam proyek fusi nuklir seperti ITER, superkonduktor digunakan untuk menahan plasma pada suhu ekstrem

DAFTAR PUSTAKA

- de Gennes, P.-G. 1999. *Superconductivity of Metals and Alloys*. Addison-Wesley.
- Kittle, C. 2005. *Introduction to Solid State Physics*, (8th edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Lange, S and Timm, C. 2023. *Theory of Superconductivity*. Institut of Theoritical Physics
- N. W. Ashcroft, and N. D. Mermin. 1976. *Solid State Physics*. Holt, Rinehart and Winston, New York.
- Tinkham, M. 2004. *Introduction to Superconductivity*, (2nd edition). McGraw-Hill, Inc., New York
- [https://common.wikimedia.org/wiki/file:type_i_and_type_ii_superc onductors.svg](https://common.wikimedia.org/wiki/file:type_i_and_type_ii_superc_onductors.svg).
- <https://sainsmini.blogspot.com/2015/08/sejarah-superkonduktor-teori-dan-sifat-sifatnya.html>

BIODATA PENULIS



Fahmy Rinanda Saputri, S.T., M.Eng.

Dosen Program Studi Teknik Fisika

Fakultas Teknik dan Informatika Universitas Multimedia Nusantara

Penulis lahir pada bulan Agustus 1993 di Cilacap. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Fisika Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Multimedia Nusantara. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada dan melanjutkan studi pada Program Magister Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada. Penulis menekuni bidang instrumentasi, fisika bangunan, dan energi baru terbarukan.

BIODATA PENULIS



Dr. Kurniati Abidin, M.Si.

Dosen Program Studi Fisika

Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Alauddin Makassar

Kurniati Abidin adalah dosen tetap di Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Alauddin Makassar sejak 2013. Beliau lahir pada 14 Oktober 1982 di Pompanua, Sulawesi Selatan, dan memiliki latar belakang pendidikan yang kuat di bidang fisika. Menyelesaikan S1 di FMIPA UNM Makassar (2001-2005) dan S2 dalam bidang Material di ITS Surabaya (2007-2009), beliau kemudian meraih gelar doktor di ITB pada tahun 2021. Beliau telah memberikan kontribusi signifikan dalam pendidikan melalui pengajaran mata kuliah seperti Fisika Kuantum, Fisika Statistik, dan Fisika Modern. Sebagai peneliti aktif, publikasinya meliputi studi tentang nanomaterial dan karakterisasi material menggunakan metode spektroskopi. Publikasi terbarunya termasuk *Effect of Precursor Gas Inlet Position Relative to Hot Wire Cells* dalam jurnal tahun 2022. Alamat email untuk korespondensi adalah kurniati.abidin@uin-alauddin.ac.id.

BIODATA PENULIS



Muh. Said L., M.Pd.

Dosen Program Studi Fisika

Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Alauddin
Makassar

Lahir di Jeneponto, tepatnya tanggal 4 September 1983. Penulis menempuh Pendidikan mulai tingkat SD (1989-1995), SMP (1995-1998), SMA (1998-2001), S1 Fisika (2001-2005) dan S2 Pendidikan Fisika (2007-2009). Sejak tahun 2009 hingga sekarang, penulis aktif sebagai Pengajar di Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar. Penulis membidangi kepakaran dibidang Fisika Kebumihan, Energi dan Lingkungan dan bidang Pendidikan Fisika. Beberapa kegiatan tri darma perguruan tinggi telah aktif dilakukan antara lain dari bidang pengajaran aktif mengajar beberapa mata kuliah yaitu: Metode Komputasi Fisika, Fisika Dasar, Fisika Matematika, Instrumentasi, Fisika Eksperimen,

Bidang penelitian dan publikasi ilmiah telah banyak dilakukan baik didanai oleh PT UIN Alauddin, maupun bersumber dari Kementerian Agama R.I. Penelitian yang dilakukan antara lain Studi Analisis Koefisien Absorpsi Papan Akustik pada Ketebalan Bervariasi Berbahan Dasar Limbah Kulit Jagung dan Sabut Kelapa (Solusi Alternatif Ramah Lingkungan) (2020), Karakterisasi Sifat Fisis Papan Partikel Sabut Kelapa-Serat Pelepah Lontar (2021), Identifikasi Zona Rawan Longsor

Menggunakan Metode Geolistrik Resistivitas di Desa Pao Kecamatan Tombolo Pao Kabupaten Gowa (2022). Adapun publikasi ilmiah lainnya yang dihasilkan dalam bentuk Jurnal Terakreditasi dan Prosiding Nasional. Penulis juga telah aktif menulis karya ilmiah buku ber-ISBN. Buku yang terbit terakhir pada tiga tahun terakhir adalah Sistem Pemurni Air Laut Menjadi Air Minum: Sebuah Terobosan dalam Mengatasi Krisis Air Bersih Bagi Komunitas Muslim Pesisir dan Pulau di Sekitar Kota Makassar (2021), Teknik Analisis Data Dan Rambat Ralat Eksperimen Fisika Dasar (Mengasah Psikomotorik Melalui Keterampilan Menganalisis Data Percobaan Fisika), BC Kinematika Partikel (2023), BC Fisika Dasar 1 (2023), BC Pencemaran Lingkungan (2023). BC Fisika Dasar 2 (2023), Buku Ajar Pengantar Laboratorium (2023), Mekanika Dasar (2024), Mekanika Lanjutan (2024). Sedangkan tridarma bidang Pengabdian kepada masyarakat juga telah aktif dilakukan perwujudan aktualisasi keilmuan ke masyarakat antara lain: Penerapan Alat Geolistrik Dalam Menentukan Struktur dan Lapisan Air Tanah (Aquifer) Bawah Permukaan di Desa Tino Kec. Tarowang Kab. Jeneponto (2022); Sosialisasi dan Pendampingan Siswa Melalui Pengenalan Praktikum Fisika Lebih Menarik (2022); Pendampingan Siswa SMA dalam Menumbuh-semangatkan Motivasi, Kreativitas dan Keterampilan Bereksperimen Melalui Praktikum Fisika di SMA Negeri 2 Bantaeng dan di SMK Negeri 4 Takalar (2023); Pembimbingan Siswa SMA dalam Praktikum Panel Surya dan Roket Air di SMA/SMK/MA se-Kab. Pangkep (2024). Akhirnya karya prestasi ini, penulis dedikasikan kepada masyarakat, bangsa dan negara, semoga apa yang diraih menjadi bermanfaat untuk semuanya.

BIODATA PENULIS



Fitriyanti, S.Si.,M.Sc.

Dosen Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Alauddin
Makassar

Penulis lahir di Parepare tanggal 25 Mei 1986. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Alauddin Makassar. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Hasanuddin Makassar dan melanjutkan S2 pada Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Gadjah Mada. sejak tahun 2012 hingga sekarang. Aktif melakukan penelitian, dan telah menerbitkan berbagai jurnal penelitian.

BIODATA PENULIS



Rahmaniah, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Fisika
Fakultas Sains Dan Teknologi

Dari partikel subatomik hingga struktur kosmos yang luas, fisika menjawab pertanyaan mendasar tentang bagaimana alam semesta bekerja, dan memberikan wawasan yang mendalam tentang dunia kita, hal inilah yang menjadi ketertarikan tersendiri bagi penulis untuk mengkaji tentang Fisika. Sejak tahun 2008 penulis bergabung di UIN Alauddin makassar sebagai tenaga pendidik khususnya di jurusan Fisika. Mekanika menjadi salah satu Mata kuliah wajib serta menjadi mata kuliah yang diampu oleh penulis. Ketertarikan Penulis dalam kajian Fisika dikembangkan dengan melakukan beberapa penelitian dalam konsentrasi Fisika Material. Beberapa kali penulis memperoleh bantuan hibah Penelitian, Publikasi, Penulisan Buku serta Kegiatan Pengabdian Kepada Masyarakat (LITAPDIMAS), baik di Tingkat Pusat (Kementerian Agama) maupun di lingkup kampus UIN Alauddin Makassar. Semoga segala hal yang telah ataupun yang akan dilakukan oleh penulis dapat memberikan sumbangsih dalam dunia Pendidikan.

BIODATA PENULIS



Jannes Bastian Selly, S.Pd., M.Si., M.Kes.

Dosen Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Nusa Cendana

Penulis lahir di Kupang, Nusa Tenggara Timur, tanggal 04 Juni 1992. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana pada program studi Pendidikan Fisika, Universitas Nusa Cendana, tahun 2013. Pendidikan magister pada program studi magister Ilmu Fisika, bidang minat Fisika Medis dan Biofisika, di Universitas Brawijaya, tahun 2015, dan pendidikan magister yang kedua, pada program studi magister Ilmu Kesehatan Masyarakat, bidang minat Kesehatan Lingkungan dan Keselamatan Kerja (KLKK), di Universitas Nusa Cendana, tahun 2019.

Penulis mulai bekerja sebagai dosen di STIKes Citra Husada Mandiri (mulai tahun 2019 telah beralih status menjadi Universitas Citra Bangsa), sejak tahun 2016 hingga tahun 2022 pada Fakultas Kesehatan. Kemudian, sejak tahun 2022 hingga saat ini, penulis menjadi dosen tetap di Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Nusa Cendana.

Penulis mulai terlibat aktif sebagai anggota dalam penulisan *book chapter* sejak tahun 2022. Hingga saat ini telah ada empat buku berISBN yang dipublikasikan yaitu buku *Metodologi Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif (2022)*, *Kesehatan Lingkungan dan Keselamatan Kesehatan Kerja (2023)*, *Termodinamika (2023)*, dan *Pengantar Fisika Kedokteran (2024)*. Buku ini merupakan *book chapter* kelima yang penulis kerjakan. Penulis berharap tulisan

dalam buku ini dapat menjadi referensi dalam bidang Fisika Zat Padat bagi pembaca.

BIODATA PENULIS



Fetronela Rambu Bobu, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Teknologi Informasi
Fakultas Pertanian, Sains, dan Kesehatan Universitas timor

Penulis lahir di Madidi Palamedu tanggal 13 April 1990. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknologi Informasi, Fakultas Pertanian, Sains, dan Kesehatan Universitas Timor. Menyelesaikan pendidikan S1 dan S2 pada Jurusan Fisika di Universitas Brawijaya Malang. Penulis menekuni bidang Biofisika dan Fisika Medis.

BIODATA PENULIS



Sefrilita Risqi Adikaning Rani

Sefrilita Risqi Adikaning Rani. Lahir di Kediri, 11 April 1994, anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Hadi Siswanto dan Siti Badrikah. Penulis menempuh pendidikan formal di TK Mutiara PG Merican Kediri (1999-2000), SDN Mojokerep (2000-2006), MTsN Model Pare Kediri (2006-2009), SMAN 2 Pare Kediri (2009-2012), kemudian penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada Departemen Fisika, menyelesaikan tahap sarjananya pada tahun 2016. Pada tahun itu juga penulis diterima sebagai mahasiswa Pascasarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada Departemen fisika dengan beasiswa Freshgraduate ITS. Penulis menyelesaikan tahap Magisternya pada tahun 2018 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada Departemen Fisika. Penulis merupakan dosen Fisika Fakultas sains dan teknologi UIN Alauddin Makassar (2019-Sekarang). Interes riset yang ditekuni yaitu pada Fisika Material Keramik dan Komposit. Beberapa penelitian yang telah dilakukan penulis telah terbit di jurnal-jurnal nasional maupun internasional. Beberapa buku ber-ISBN juga pernah ditulis dibidang Fisika dan Aplikasinya.

BIODATA PENULIS



Nurul Fuadi, S.Si., M.Si.
Dosen Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Alauddin Makassar

Penulis lahir di Sengkang kab. Wajo pada tanggal 30 Oktober 1983. Anak ke 1 dari 2 bersaudara merupakan Lulusan Sarjana Fisika (S1) Fakultas MIPA di Universitas Hasanuddin Makassar pada tahun 2007 dan juga telah menyelesaikan pendidikan Magister (S2) pada jurusan Biofisika Fakultas MIPA, Institut Pertanian Bogor pada tahun 2010. Saat ini Penulis aktif mengajar di jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Alauddin Makassar. Mata kuliah yang diajarkan diantaranya Fisika Dasar, Biofisika, Termodinamika, Fisika Statistik, Biomaterial, Biokimia dan Anatomi dan Fisiologi Tubuh Manusia. Penulis telah menulis beberapa buku referensi diantaranya Fisika Dasar 2, Fisika Optik, Mekanika Dasar, Anatomi Olahraga, Fisika Kesehatan dan Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) Terpadu. Penulis juga aktif menerbitkan beberapa artikel baik jurnal Nasional bersinta maupun prosiding Nasional dan Internasional. Penulis juga sebagai reviewer pada jurnal JFT Jurusan Fisika UINAM dan jurnal JPF Jurusan Pendidikan Fisika UINAM. Serta aktif dalam organisasi bidang kepakaran maupun non kepakaran.

Email: nurul.fuadi@uin-alauddin.ac.id