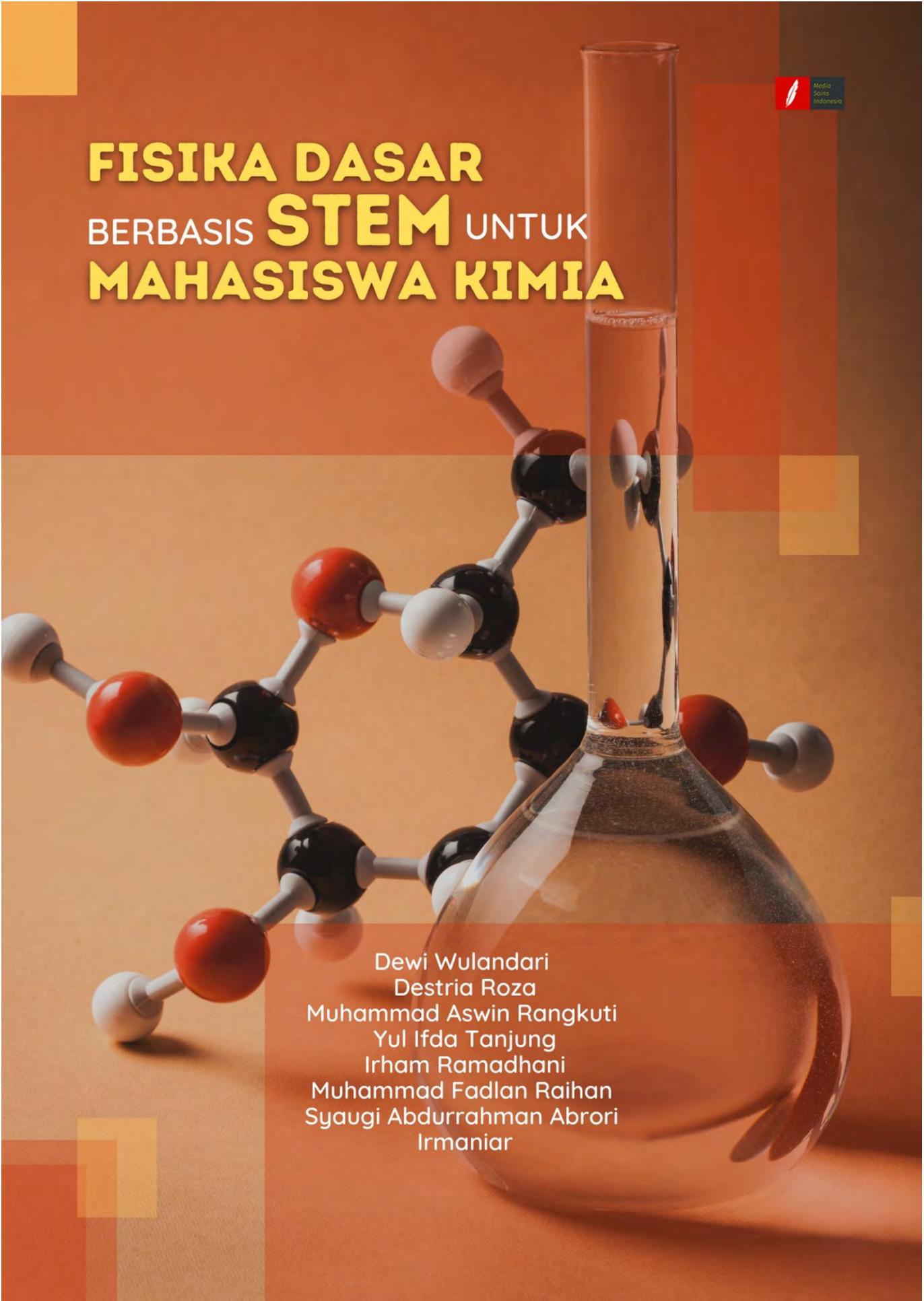


# FISIKA DASAR BERBASIS **STEM** UNTUK MAHASISWA KIMIA



Dewi Wulandari  
Destria Roza  
Muhammad Aswin Rangkuti  
Yul Ifda Tanjung  
Irham Ramadhani  
Muhammad Fadlan Raihan  
Syaugi Abdurrahman Abrori  
Irmaniar

**FISIKA DASAR BERBASIS STEM  
UNTUK MAHASISWA KIMIA**

## **UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta**

### **Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4**

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

### **Pembatasan Pelindungan Pasal 26**

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditunjukkan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

### **Sanksi Pelanggaran Pasal 113**

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

# **FISIKA DASAR BERBASIS STEM UNTUK MAHASISWA KIMIA**

Dewi Wulandari,  
Destria Roza,  
Muhammad Aswin Rangkuti,  
Yul Ifda Tanjung,  
Irham Ramadhani,  
Muhammad Fadlan Raihan,  
Syauqi Abdurrahman Abrori,  
Irmaniar

Penerbit



CV. MEDIA SAINS INDONESIA  
Melong Asih Regency B40 - Cijerah  
Kota Bandung - Jawa Barat  
[www.medsan.co.id](http://www.medsan.co.id)

Anggota IKAPI  
No. 370/JBA/2020

# **FISIKA DASAR BERBASIS STEM UNTUK MAHASISWA KIMIA**

Dewi Wulandari,  
Destria Roza,  
Muhammad Aswin Rangkuti,  
Yul Ifda Tanjung,  
Irham Ramadhani,  
Muhammad Fadlan Raihan,  
Syaugi Abdurrahman Abrori,  
Irmaniar

Editor :  
**Rintho R. Rerung**

Tata Letak :  
**Rizki R. Pratama**

Desain Cover :  
**Syahrul Nugraha**

Ukuran :  
**B5: 18,2 x 25,7 cm**

Halaman :  
**vi, 312**

ISBN :  
**978-623-362-778-8**

Terbit Pada :  
**November, 2022**

Hak Cipta 2022 @ Media Sains Indonesia dan Penulis

*Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit atau Penulis.*

**PENERBIT MEDIA SAINS INDONESIA**  
(CV. MEDIA SAINS INDONESIA)  
Melong Asih Regency B40 - Cijerah  
Kota Bandung - Jawa Barat  
[www.medsan.co.id](http://www.medsan.co.id)

## KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur kami panjatkan selalu kepada Allah SWT atas Rahmat, Taufiq, dan Hidayah yang sudah diberikan sehingga kami bisa menyelesaikan buku ajar yang berjudul “Fisika Dasar berbasis STEM untuk Mahasiswa Kimia”. Tujuan dari penulisan buku ini tidak lain adalah untuk membantu para mahasiswa kimia dalam memahami konsep fisika yang diaplikasikan dalam bidang ilmu kimia dengan mengintegrasikan STEM (*Sciences, Technology, Engineering and Math*) sehingga diharapkan dapat meningkatkan literasi sains mahasiswa.

Kami mengucapkan banyak terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu memberikan wawasan dan bimbingan kepada kami sebelum maupun ketika menulis buku ini.

Kami juga sadar bahwa buku yang kami buat masih jauh dari sempurna. Masih banyak bagian yang harus direvisi. Maka dari itu, kami meminta dukungan dan masukan dari para pembaca, agar buku ini dapat direvisi kembali berdasarkan *feedback* dari pembaca sehingga menjadi lebih baik.

Medan, Oktober 2022  
Tim Penulis



## DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	iii
BAB 1 KATALIS.....	1
Tujuan Pembelajaran .....	1
Pengantar.....	1
Energi bebas Gibbs .....	2
Mekanisme dan Laju Reaksi.....	6
Persamaan Arrhenius.....	9
Apa itu katalis?.....	12
Jenis-Jenis Katalis .....	16
Katalis di Kehidupan Sehari-hari .....	18
Katalis Berbahaya di Atmosfer .....	20
Contoh Katalis Lainnya .....	22
Soal .....	23
BAB 2 PEMISAHAN ZAT.....	29
Tujuan Pembelajaran .....	29
Pengantar.....	29
Pemisahan Berdasarkan Ukuran .....	30
Pemisahan Berdasar Massa atau Berat Jenis.....	32
Pemisahan Berdasar Perubahan Fasa .....	35
Metode Pemisahan Tingkat Lanjut .....	39
Pemisahan Magnetik .....	48
Soal .....	53
BAB 3 GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK INFRAMERAH (FTIR) DAN SINAR-X (XRF).....	57
Kompetensi Dasar .....	57
Tujuan Pembelajaran .....	57
Pendahuluan.....	57

Gelombang Elektromagnetik .....	59
Spektrum Gelombang Elektromagnetik.....	60
Inframerah.....	63
Sinar-X .....	64
Interferensi.....	65
Difraksi.....	70
STEM .....	72
X-Ray Fluorescence (XRF) Spectrometry.....	78
Soal 82	
<b>BAB 4 REKAYASA MATERIAL MELALUI PELAPISAN</b>	
<b>PERMUKAAN BAHAN (COATING).....</b>	<b>85</b>
Tujuan Pembelajaran .....	85
Pendahuluan.....	85
Struktur Material dan Karakteristiknya .....	87
Rekayasa Material dan Metodenya .....	120
Rekayasa Material melalui Pelapisan	
(Fungsional Coating) .....	122
Teknologi Thermal Spray untuk Pelapisan .....	123
Sifat Fisik dan Mekanik dari Coating	
menggunakan HVOF .....	128
Soal .....	130
<b>BAB 5 DESAIN BATERAI AKI .....</b>	<b>133</b>
Kompetensi Dasar .....	133
Tujuan Pembelajaran .....	133
Pendahuluan.....	133
Elektrokimia .....	134
Arus Listrik .....	136
Hambatan Listrik .....	138
Konduktivitas Listrik.....	139
Daya Listrik .....	140

STEM .....	142
Soal .....	154
<b>BAB 6 SABUN DAN DETERGEN SERTA KAITANNYA DENGAN FLUIDA.....</b>	<b>157</b>
Kompetensi Dasar .....	157
Tujuan Pembelajaran .....	157
Pendahuluan.....	157
Fluida .....	158
Bentuk Permukaan Fluida Statis .....	159
Tegangan Permukaan.....	160
Koloid.....	167
Kohesi dan Adhesi.....	169
Kegunaan Koloid pada Bahan Pencuci .....	169
STEM .....	170
Soal .....	178
<b>BAB 7 SUPERKONDUKTOR .....</b>	<b>181</b>
Tujuan Pembelajaran .....	181
Pendahuluan.....	181
Menenal Superkonduktor .....	184
Klasifikasi Superkonduktor .....	186
Sifat Superkonduktor.....	187
Superkonduktor Suhu Tinggi (SKST).....	190
Sintesis Superkonduktor.....	195
Aplikasi Superkonduktor .....	223
Soal .....	276
<b>BAB 8 TERMODINAMIKA.....</b>	<b>279</b>
Kompetensi Dasar .....	279
Tujuan Pembelajaran .....	279
Pendahuluan.....	279
Sistem dan Lingkungan .....	282

Keseimbangan (Hukum Termodinamika Ke Nol).....	283
Suhu dan Kalor.....	284
Usaha/Kerja .....	290
Energi dari Sistem (Hukum Termodinamika Pertama) .....	293
Hukum Termodinamika Kedua .....	297
Soal .....	302
STEM .....	303
DAFTAR PUSTAKA.....	309

# BAB 1

## KATALIS

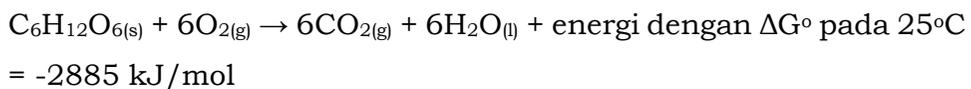
### Tujuan Pembelajaran

Mahasiswa akan dapat:

1. menjelaskan bagaimana kehadiran katalis mempengaruhi laju reaksi kimia,
2. menghubungkan perubahan dalam diagram reaksi dan energi aktivasi dengan aksi katalitik dan jalur reaksi alternatif,
3. memahami penggunaan dan manfaat katalis dalam kehidupan nyata.

### Pengantar

Kita dapat belajar dan berpikir karena otak kita memperoleh energi dari makanan yang kita makan. Energi tersebut didapat dari oksidasi glukosa. Oksidasi glukosa dapat direpresentasikan dalam reaksi kimia berikut:



Tanpa reaksi ini, proses belajar akan jauh lebih sulit. Untungnya, reaksi oksidasi glukosa ini cenderung berlangsung spontan secara termodinamika pada 25°C karena energi bebas Gibbs ( $\Delta G^\circ$ ) < 0.

Kita juga bisa melihatnya pada makanan yang manis, contohnya kismis. Biarkan kismis tersebut bereaksi dengan  $\text{O}_2$  dengan cara biarkan bersentuhan dengan udara terbuka. Apa yang terjadi?

Apakah Anda menemukan pelepasan energi panas? Pembentukan air dan gas karbon dioksida?

Kemungkinan besar hal yang terjadi adalah, kismis tidak banyak berubah selain mungkin sedikit lebih kering. Meskipun oksidasi glukosa adalah reaksi yang berlangsung spontan secara termodinamika, ternyata laju reaksinya sangat lambat.

Laju reaksi ini sendiri bergantung pada faktor-faktor seperti:

- Energi aktivasi
- Suhu: jika Anda memanaskan kismis hingga suhu yang cukup tinggi, kismis mungkin akan terbakar dan teroksidasi

Kedua faktor ini terkait erat, peningkatan suhu reaksi meningkatkan energi kinetik molekul reaktan. Hal ini meningkatkan kemungkinan bahwa kismis akan memiliki energi yang cukup untuk melewati batas energi aktivasi.

Bagaimana tubuh Anda memecahkan masalah energi aktivasi ini untuk oksidasi glukosa? Lagipula, suhu tubuhmu tidak jauh lebih tinggi dari 25°C, jadi bagaimana reaksi ini terjadi terus menerus di tubuh Anda?

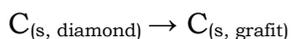
Sistem biologis menggunakan katalis untuk meningkatkan laju reaksi oksidasi sehingga dapat terjadi pada laju yang lebih cepat pada suhu yang lebih rendah. Dalam bagian ini, kita akan mendiskusikan lebih banyak tentang apa itu katalis, cara kerjanya, dan berbagai jenis katalis.

### **Energi bebas Gibbs**

Sebelum mendalami lebih lanjut tentang katalis, ada baiknya kita ingat kembali mengenai Energi bebas Gibbs. Dalam kimia, proses spontan adalah proses yang terjadi tanpa penambahan energi luar.

---

Proses spontan dapat berlangsung cepat atau lambat, karena spontanitas tidak berhubungan dengan kinetika atau laju reaksi. Contoh klasik adalah proses karbon dalam bentuk berlian menjadi grafit, yang dapat ditulis sebagai reaksi berikut:



Reaksi ini berlangsung sangat lama sehingga tidak dapat dideteksi pada skala waktu manusia biasa. Jika kita bisa menunggu cukup lama, kita seharusnya bisa melihat karbon dalam bentuk berlian berubah menjadi bentuk grafit yang lebih stabil tetapi kurang berkilau.



Gambar 1. 1 Sampel berlian dan grafit

Hal lain yang perlu diingat adalah bahwa proses spontan bisa berupa reaksi eksotermik atau endotermik. Sehingga, spontanitas tidak selalu berhubungan dengan perubahan entalpi suatu proses,  $\Delta H$ .

Bagaimana kita tahu jika suatu proses akan terjadi secara spontan? Jawaban singkat namun sedikit rumit adalah bahwa kita dapat menggunakan hukum kedua termodinamika. Menurut hukum kedua termodinamika, setiap proses spontan harus meningkatkan entropi di alam semesta. Hal ini dapat dinyatakan secara matematis sebagai berikut:

---

$$\Delta S_{\text{semesta}} = \Delta S_{\text{sistem}} + \Delta S_{\text{lingkungan}} > 0$$

Jadi yang harus kita lakukan hanyalah mengukur perubahan entropi seluruh alam semesta, bukan? Sayangnya, menggunakan hukum kedua dalam bentuk di atas bisa jadi agak rumit dalam praktiknya. Lagi pula, sebagian besar ahli kimia hanya tertarik pada perubahan dalam sistem kita, yang mungkin merupakan reaksi kimia dalam gelas kimia. Apakah kita benar-benar harus menyelidiki seluruh alam semesta juga?

Untungnya, ahli kimia dapat menghindari keharusan untuk menentukan perubahan entropi alam semesta dengan mendefinisikan dan menggunakan besaran termodinamika baru yang disebut **energi bebas Gibbs**.

Ketika suatu proses terjadi pada suhu konstan, kita dapat menulis ulang hukum kedua termodinamika dan menentukan besaran baru yang dikenal sebagai energi bebas Gibbs:

$$\text{Energi bebas Gibbs} = G = H - TS$$

di mana  $H$  adalah entalpi,  $T$  adalah suhu (dalam kelvin,  $K$ ), dan  $S$  adalah entropi. Energi bebas Gibbs dilambangkan dengan simbol  $G$ .

Saat menggunakan energi bebas Gibbs untuk menentukan spontanitas suatu proses, kita hanya memperhatikan perubahan dalam  $G$ , daripada nilai absolutnya. Perubahan energi bebas Gibbs untuk suatu proses ditulis sebagai  $\Delta G$ , yang merupakan perbedaan antara  $G_{\text{awal}}$ , energi bebas Gibbs dari reaktan, dan  $G_{\text{akhir}}$ , energi bebas Gibbs dari produk.

$$\Delta G = G_{\text{akhir}} - G_{\text{awal}}$$

Untuk proses pada temperatur  $T$  dan tekanan  $P$  yang konstan, kita dapat menulis ulang persamaan untuk energi bebas Gibbs dalam

---

---

bentuk perubahan entalpi ( $\Delta H_{sistem}$ ) dan entropi ( $\Delta S_{sistem}$ ) sistem kita.

$$\Delta G_{sistem} = \Delta H_{sistem} - T\Delta S_{sistem}$$

Anda mungkin akan melihat reaksi ini ditulis di tempat lain tanpa subskrip yang menetapkan bahwa nilai termodinamika adalah untuk sistem (bukan lingkungan atau alam semesta), tetapi masih dapat dipahami bahwa nilai untuk  $\Delta H$  dan  $\Delta S$  adalah untuk sistem yang diinginkan. Persamaan ini menarik karena memungkinkan kita untuk menentukan perubahan energi bebas Gibbs menggunakan perubahan entalpi,  $\Delta H$ , dan perubahan entropi,  $\Delta S$ , dari sistem. Kita dapat menggunakan tanda dari  $\Delta G$  untuk mengetahui apakah suatu reaksi spontan dalam arah maju, arah mundur, atau apakah reaksi berada dalam kesetimbangan.

- Ketika  $\Delta G < 0$ , prosesnya eksergonik dan akan berjalan secara spontan ke arah produk.
- Ketika  $\Delta G > 0$ , prosesnya endergonik dan tidak spontan dalam arah produk. Sebaliknya, proses akan berlanjut secara spontan ke arah reaktan.
- Ketika  $\Delta G = 0$ , sistem berada dalam kesetimbangan dan konsentrasi produk dan reaktan akan tetap konstan.

Walaupun energi bebas Gibbs bergantung pada temperatur, secara umum dapat diasumsikan bahwa nilai  $\Delta H$  dan  $\Delta S$  tidak bergantung pada temperatur selama tidak terdapat perubahan fasa pada reaksi. Artinya, jika kita mengetahui nilai  $\Delta H$  dan  $\Delta S$ , kita dapat menggunakannya untuk menghitung  $\Delta G$  pada sembarang temperatur.

Kemudian, jika kita lihat lebih jauh lagi pada persamaan energi bebas Gibbs, nilai  $\Delta G_{sistem}$  bergantung pada tiga variabel:

- 
- perubahan entalpi  $\Delta H_{sistem}$
  - temperatur  $T$
  - perubahan entropi  $\Delta S_{sistem}$

Temperatur pada persamaan ini selalu bernilai positif (atau nol) karena satuannya Kelvin. Sehingga, suku kedua persamaan kita,  $T\Delta S_{sistem}$  akan selalu memiliki tanda yang sama dengan  $\Delta S_{sistem}$ . Kita dapat membuat kesimpulan berikut ketika reaksi memiliki  $\Delta G_{sistem}$  yang negatif:

- Ketika prosesnya eksotermik ( $\Delta H_{sistem} < 0$ ), dan entropi sistem bertambah ( $\Delta S_{sistem} > 0$ ), tanda  $\Delta G_{sistem}$  selalu negatif untuk temperatur berapapun. Sehingga, prosesnya selalu berlangsung spontan.
- Ketika prosesnya endotermik ( $\Delta H_{sistem} > 0$ ), dan entropi sistem berkurang ( $\Delta S_{sistem} < 0$ ), tanda  $\Delta G_{sistem}$  selalu positif untuk temperatur berapapun. Sehingga, prosesnya tidak akan berlangsung spontan.

Untuk kombinasi lain dari  $\Delta H_{sistem}$  dan  $\Delta S_{sistem}$ , kespontanan reaksi bergantung pada temperatur.

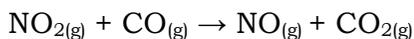
- Reaksi eksotermik ( $\Delta H_{sistem} < 0$ ) yang mengurangi entropi sistem ( $\Delta S_{sistem} < 0$ ) akan berlangsung spontan pada temperatur rendah.
- Reaksi endotermik ( $\Delta H_{sistem} > 0$ ) yang menambah entropi sistem ( $\Delta S_{sistem} > 0$ ) akan berlangsung spontan pada temperatur tinggi.

### **Mekanisme dan Laju Reaksi**

Salah satu aplikasi kinetika yang paling penting adalah untuk mempelajari mekanisme reaksi, atau urutan langkah-langkah di

---

mana reaksi kimia terjadi. Sebagai contoh, perhatikan reaksi nitrogen dioksida dengan karbon monoksida:



Berdasarkan persamaan yang seimbang di atas, kita dapat berhipotesis bahwa reaksi ini terjadi oleh tumbukan tunggal antara molekul nitrogen dioksida dan molekul karbon monoksida. Dengan kata lain, kita dapat berhipotesis bahwa reaksi ini adalah **reaksi elementer**. Reaksi elementer adalah reaksi yang terjadi dalam satu langkah dengan hanya satu keadaan transisi. Karena reaksi elementer merupakan interaksi yang sebenarnya antara partikel reaktan, hukum laju untuk reaksi elementer dapat diturunkan dari stoikiometri persamaan seimbang.

Jika demikian halnya, maka hukum laju akan didasarkan pada koefisien reaktan dalam persamaan kimia yang seimbang:

$$\text{laju} = k[\text{NO}_2][\text{CO}]$$

Namun, ketika reaksi ini dipelajari secara eksperimental, hukum laju sebenarnya diamati sebagai

$$\text{laju} = k[\text{NO}_2]^2$$

Karena hukum laju eksperimen tidak cocok dengan hukum yang diturunkan dengan mengasumsikan reaksi elementer, kita segera tahu bahwa reaksi ini melibatkan lebih dari satu langkah. Reaksi yang terjadi dalam dua atau lebih langkah dasar disebut reaksi bertingkat atau kompleks. Seperti yang akan kita lihat di bagian berikutnya, kita dapat menggunakan hukum laju eksperimental untuk membantu menyimpulkan langkah-langkah yang mungkin terlibat dalam mekanisme reaksi bertingkat.

Setelah hukum laju percobaan untuk suatu reaksi diketahui, ahli kimia dapat mulai merancang dan menyelidiki kemungkinan

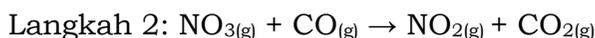
---

---

mekanisme reaksi. Minimal, mekanisme reaksi yang mungkin harus memenuhi dua kondisi berikut:

1. Persamaan untuk langkah-langkah dasar dalam mekanisme harus ditambahkan ke persamaan keseluruhan untuk reaksi.
2. Mekanisme harus konsisten dengan hukum laju percobaan.

Mari kita gunakan kondisi ini untuk mengevaluasi mekanisme yang diusulkan untuk reaksi antara  $\text{NO}_2$  dan  $\text{CO}$ . Secara umum diyakini bahwa reaksi ini terjadi melalui dua langkah dasar:



Perhatikan bahwa satu molekul,  $\text{NO}_3$ , muncul di kedua langkah mekanisme reaksi tetapi tidak muncul dalam persamaan keseluruhan. Dalam hal ini,  $\text{NO}_3$  adalah **zat antara reaksi**, suatu spesi yang terbentuk dalam satu langkah dan dikonsumsi pada langkah berikutnya.

Selanjutnya, mari kita tentukan apakah mekanisme dua langkah kita konsisten dengan hukum laju eksperimental. Untuk melakukannya, kita perlu mengetahui langkah mana dari dua langkah tersebut yang merupakan **reaksi penentu laju**, atau reaksi paling lambat dalam mekanisme. Karena suatu reaksi tidak dapat terjadi lebih cepat dari tahap yang paling lambat, reaksi penentu laju secara efektif membatasi laju reaksi secara keseluruhan. Ini analog dengan bagaimana kemacetan lalu lintas membatasi tingkat keseluruhan di mana mobil dapat bergerak di sepanjang jalan raya, bahkan jika bagian lain dari jalan raya itu lancar.

Dalam mekanisme yang kita usulkan, langkah penentuan laju diyakini sebagai langkah 1:

---

Langkah 1 (lambat):  $\text{NO}_{2(g)} + \text{NO}_{2(g)} \rightarrow \text{NO}_{(g)} + \text{NO}_{3(g)}$

Langkah 2 (cepat):  $\text{NO}_{3(g)} + \text{CO}_{(g)} \rightarrow \text{NO}_{2(g)} + \text{CO}_{2(g)}$

Karena langkah 1 membatasi laju reaksi keseluruhan, hukum laju untuk langkah ini akan sama dengan hukum laju keseluruhan. Oleh karena itu, hukum laju yang diprediksi untuk reaksi keseluruhan adalah

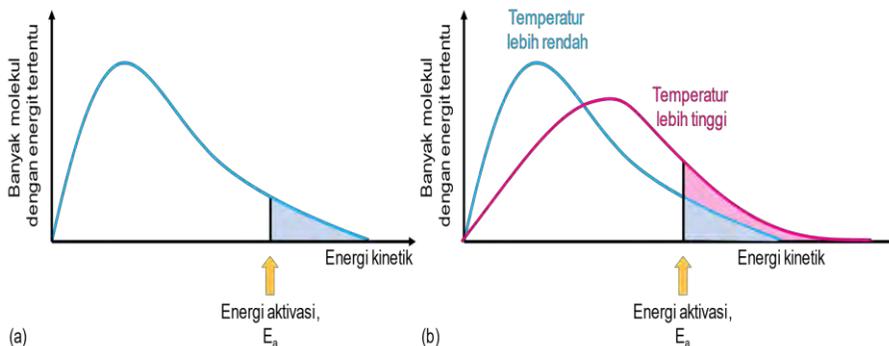
$$\text{laju} = k[\text{NO}_2]^2$$

Hukum laju ini sesuai dengan hukum laju yang ditentukan secara eksperimental yang kita lihat sebelumnya, jadi mekanismenya juga memenuhi syarat kedua. Karena mekanisme reaksi memenuhi kedua kondisi, kita dapat dengan aman mengatakan bahwa ini adalah mekanisme yang valid untuk reaksi.

### **Persamaan Arrhenius**

Energi aktivasi,  $E_a$ , dari suatu reaksi adalah energi yang diperlukan agar reaksi dapat berlangsung. Perhatikan gas seperti  $\text{H}_2$  yang terkandung dalam bejana tertutup pada suhu tetap. Molekul-molekul bergerak terus-menerus, tetapi beberapa molekul bergerak lebih cepat daripada yang lain. Energi kinetik,  $Ek$ , dari sebuah molekul berhubungan dengan kecepatan molekul,  $v$ , dengan persamaan

$$Ek = \frac{1}{2}mv^2; m = \text{massa molekul}$$

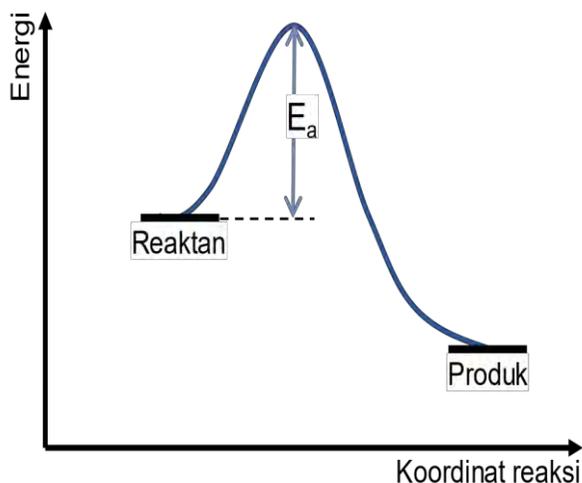


Gambar 1.2. Kurva Distribusi Boltzmann untuk temperatur yang berbeda

Distribusi energi kinetik digambarkan oleh kurva distribusi Boltzmann. Kurva Gambar 1.2 tidak simetris dan menunjukkan bahwa terdapat lebih banyak molekul yang memiliki energi rendah daripada yang memiliki energi tinggi. Distribusi energi kinetik Boltzmann bergantung pada temperatur, dan Gambar 1.2 menunjukkan distribusi tipikal pada dua temperatur. Jumlah molekul dalam sampel tertentu tetap konstan, sehingga luas di bawah dua grafik harus sama. Namun, maksimum grafik bergeser ke energi yang lebih tinggi pada suhu yang lebih tinggi. Perubahan bentuk grafik sesuai dengan fakta bahwa terdapat lebih banyak molekul yang mempunyai energi tinggi pada suhu yang lebih tinggi.

Reaksi dapat berlangsung hanya jika molekul memiliki energi minimum tertentu,  $E_a$ . Untuk reaksi tertentu, energi aktivasi (Gambar 1.3) pada dasarnya memiliki nilai tetap;  $E_a$  tidak bergantung pada suhu. Jika kita memilih suatu nilai sembarang pada Gambar 1.2 sebagai  $E_a$ , maka kita dapat melihat bahwa jumlah molekul yang memiliki energi ini, atau lebih tinggi, meningkat seiring dengan peningkatan suhu. Ini berarti bahwa seiring peningkatan suhu, lebih banyak molekul yang dapat bereaksi, sehingga terdapat peningkatan laju reaksi. Pada aplikasi real, sering ditemukan bahwa kenaikan suhu 10 K menyebabkan

laju reaksi menjadi sekitar dua kali lipat. Oleh karena itu, walaupun peningkatan suhu tidak mengubah energi aktivasi, namun peningkatan suhu mempercepat laju reaksi.



Gambar 1.3. Kurva Energi Aktivasi

Diskusi di atas dikuantifikasi oleh Persamaan Arrhenius yang menggambarkan hubungan antara konstanta laju,  $k$ , dan energi aktivasi,  $E_a$  sebagai berikut:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$$

dimana  $A$  disebut faktor pra-eksponensial,  $R$  konstanta gas, dan  $T$  temperatur sistem dalam Kelvin. Faktor frekuensi atau faktor pra-eksponensial,  $A$ , dapat dianggap sebagai konstanta untuk reaksi tertentu. Ia memiliki satuan yang sama dengan konstanta laju dan terkait dengan laju tumbukan antara molekul reaktan dan juga dengan orientasi relatif reaktan.

Beberapa nilai khas energi aktivasi tercantum dalam Tabel, dan data tersebut menggambarkan efek yang dimiliki katalis terhadap nilai  $E_a$  untuk reaksi tertentu.

Tabel 1.1. Nilai energi aktivasi untuk berbagai reaksi. Perhatikan efek katalis terhadap perubahan nilai  $E_a$

Reaksi	Keterangan	$E_a/\text{kJ mol}^{-1}$
$2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	tanpa katalis	79
$2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	katalis enzim	23
$2\text{HI} \rightarrow \text{H}_2 + \text{I}_2$	tanpa katalis	185
$2\text{HI} \rightarrow \text{H}_2 + \text{I}_2$	katalis emas	121
$2\text{HI} \rightarrow \text{H}_2 + \text{I}_2$	katalis platina	59
$2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$	tanpa katalis	335
$2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$	katalis tungsten	162

### Apa itu katalis?

Sekarang mari kita kembali ke bahasan kita mengenai katalis. **Katalis** adalah zat yang dapat ditambahkan ke reaksi untuk meningkatkan laju reaksi tanpa dikonsumsi dalam proses. Pada akhir reaksi, katalis akan kembali pada bentuk semula sebelum ditambahkan ke reaksi. Katalis biasanya bekerja dengan cara:

- Menurunkan energi keadaan transisi, sehingga menurunkan energi aktivasi, dan/atau
- Mengubah mekanisme reaksi. Ini juga mengubah sifat (dan energi) dari keadaan transisi.

Katalis ada di mana-mana! Banyak proses biokimia, seperti oksidasi glukosa, sangat bergantung pada **enzim**, protein yang bertindak sebagai katalis.

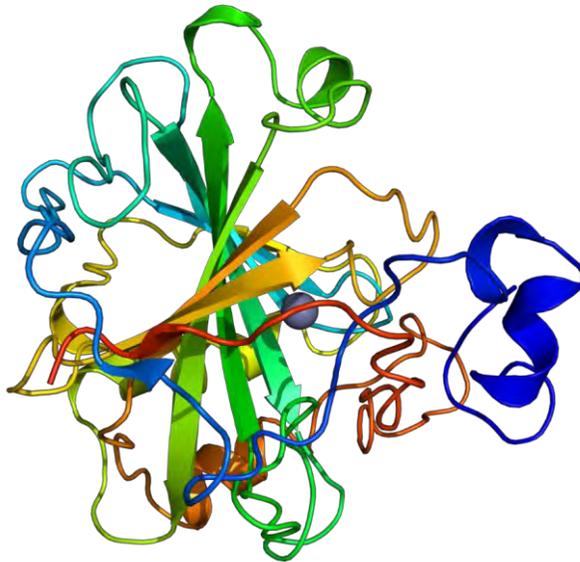
Contoh katalis enzim: Karbonat anhidrase

Enzim karbonat anhidrase mengkatalisis reaksi reversibel karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) untuk membentuk asam karbonat ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Ketika konsentrasi  $\text{CO}_2$  di dalam tubuh terlalu tinggi, karbonat anhidrase mengkatalisis reaksi berikut:



---

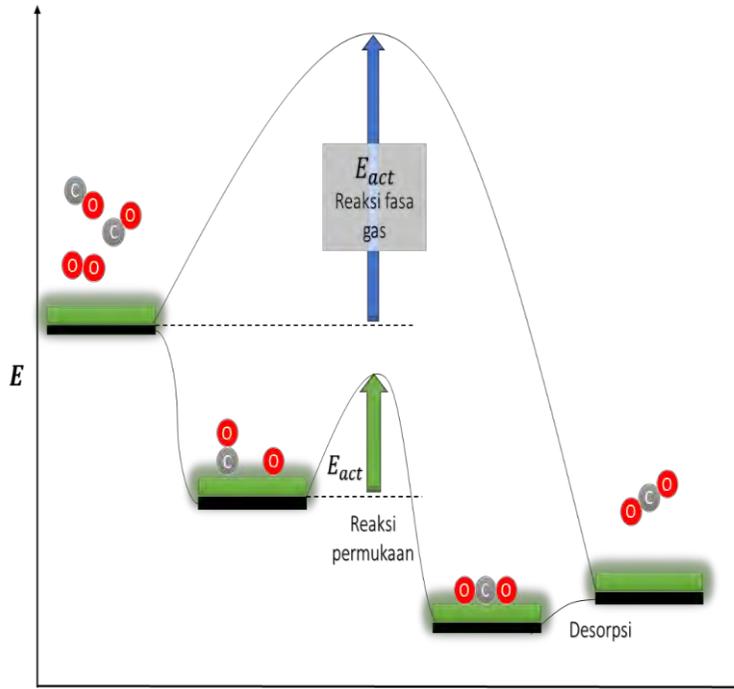
Dengan mengatur konsentrasi asam karbonat dalam darah dan jaringan, enzim mampu menjaga keseimbangan pH dalam tubuh.



Gambar 1.4. Enzim Karbonat Anhidrase

Karbonat anhidrase adalah salah satu enzim tercepat yang diketahui, dengan laju reaksi antara  $10^4$  hingga  $10^6$  reaksi per detik. Ini bahkan lebih menakjubkan jika kita membandingkan dengan reaksi tanpa katalis, yang memiliki laju  $\sim 0,2$  reaksi per detik. Terdapat peningkatan  $\sim 10^5 - 10^7$  kali dalam lajunya.

Sebagai contoh lain, mari kita perhatikan oksidasi katalitik CO pada logam mulia seperti platina (Pt). Karbon monoksida teradsorpsi secara molekuler, sedangkan  $O_2$  terdisosiasi. Adsorpsi adalah proses eksotermik yang menurunkan energi potensial. Selanjutnya, CO dan O yang teradsorpsi bereaksi di permukaan untuk menghasilkan  $CO_2$ , yang terikat lemah dan terdesorpsi ke dalam fase gas, meninggalkan permukaan, siap untuk peristiwa reaksi berikutnya.



Gambar 1.5. Diagram Reaksi oksidasi katalitik CO pada platina (Pt)

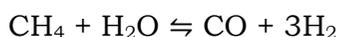
Gambar 1.5 menunjukkan bagaimana katalis menawarkan jalur alternatif untuk reaksi, dengan mekanisme yang lebih kompleks daripada reaksi fase gas langsung, tetapi mengarah pada energi keadaan transisi yang lebih rendah. Karena energi aktivasi adalah perbedaan antara energi keadaan transisi dan energi reaktan, menurunkan energi keadaan transisi juga menurunkan energi aktivasi. Persamaan Arrhenius menggambarkan hubungan antara konstanta laju,  $k$ , dan energi aktivasi,  $E_a$  sebagai berikut:

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$$

dimana  $A$  disebut faktor pra-eksponensial,  $R$  konstanta gas, dan  $T$  temperatur sistem dalam Kelvin.

Perhatikan bahwa keseluruhan perubahan energi bebas ditentukan oleh reaktan dan produk saja, sama sekali tidak ditentukan oleh katalis. Oleh karena itu, jika konversi reaksi fase

gas di bawah kondisi suhu dan tekanan tertentu terbatas pada konsentrasi kesetimbangan produk dan reaktan, maka katalis tidak dapat mengubahnya. Katalis mempengaruhi kinetika reaksi, tetapi BUKAN termodinamika reaksi. Hal penting lainnya yang perlu diperhatikan adalah bahwa katalis menawarkan jalur yang menguntungkan secara energetik tidak hanya untuk reaksi maju tetapi juga untuk reaksi sebaliknya. Oleh karena itu, katalis yang efektif digunakan untuk pembentukan CO<sub>2</sub> dari CO dan O<sub>2</sub> juga akan menjadi pilihan yang baik untuk reaksi balik. Sebagai contoh,



Reaksi ini dikenal sebagai *steam reforming* metana untuk menghasilkan gas sintesis (CO + H<sub>2</sub>), yang merupakan reaksi endotermik yang dilakukan dengan katalis nikel pada suhu tinggi. Reaksi sebaliknya adalah reaksi metanasi (eksotermik) yang digunakan untuk memurnikan H<sub>2</sub> dari jejak CO atau bahkan untuk menghasilkan gas alam pengganti dari batubara atau biomassa. Reaksi ini juga menggunakan katalis nikel tetapi pada suhu yang jauh lebih rendah daripada *steam reforming*.

Penguasaan keahlian katalisis sangat penting dalam industri kimia karena dua alasan utama. Sesuai definisinya, katalis memungkinkan reaksi berlangsung lebih cepat sehingga industri dapat menggunakan reaktor yang lebih kecil serta kondisi suhu dan tekanan yang lebih ringan. Dengan demikian, biaya yang dibutuhkan dapat dikurangi.

Namun, alasan yang lebih penting adalah kenyataan bahwa katalis memungkinkan peningkatan konversi yang diinginkan, tanpa meningkatkan laju pembentukan produk yang tidak diinginkan. Dengan kata lain, selektivitas konversi dapat ditingkatkan. Produk yang lebih diinginkan dapat dihasilkan untuk jumlah bahan baku

---

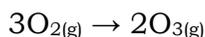
yang sama, membatasi produksi limbah, serta mengurangi kebutuhan untuk memisahkan produk dari limbah yang dihasilkan oleh reaksi yang tidak selektif. Hasilnya adalah biaya dapat ditekan, baik dari segi investasi maupun biaya operasional.

### **Jenis-Jenis Katalis**

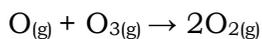
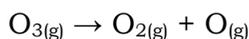
#### Katalis Homogen

Katalis homogen berada dalam fase yang sama dengan reaktan. Katalis ini berinteraksi dengan reaktan untuk membentuk zat antara, yang kemudian terurai atau bereaksi dengan reaktan lain dalam satu atau lebih langkah untuk meregenerasi katalis semula dan membentuk produk.

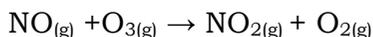
Sebagai ilustrasi dari katalisis homogen, perhatikan lapisan ozon bumi. Ozon di bagian atas atmosfer, yang melindungi bumi dari radiasi ultraviolet, terbentuk ketika molekul oksigen menyerap sinar ultraviolet dan mengalami reaksi:

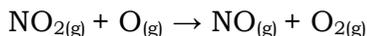
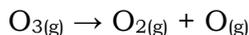


Ozon adalah molekul yang relatif tidak stabil yang terurai untuk menghasilkan oksigen diatomik dengan kebalikan dari persamaan ini. Reaksi dekomposisi ini konsisten dengan mekanisme dua langkah berikut:

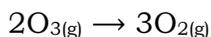


Sejumlah zat dapat mengkatalisis dekomposisi ozon. Misalnya, dekomposisi ozon yang dikatalisis nitrit oksida diyakini terjadi melalui mekanisme tiga langkah berikut:





Kita lihat, reaksi keseluruhannya sama, baik untuk mekanisme tanpa katalis dua langkah maupun untuk mekanisme katalis NO tiga langkah, yaitu:



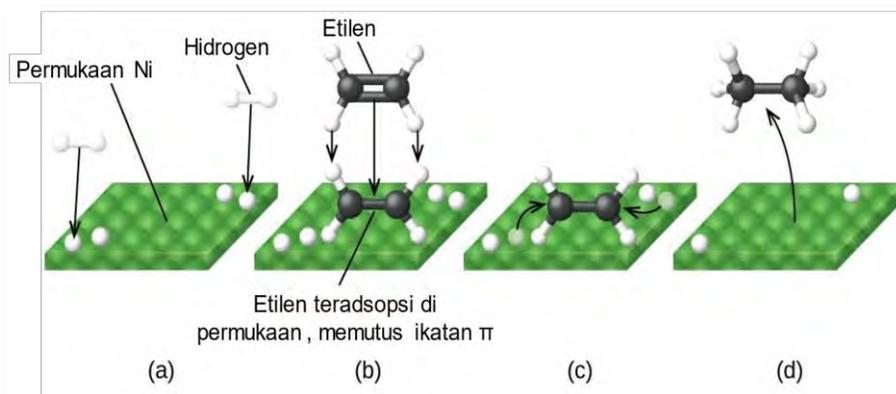
Perhatikan bahwa NO adalah reaktan pada langkah pertama mekanisme dan produk pada langkah terakhir. Ini adalah sifat karakteristik lain dari katalis: Meskipun berpartisipasi dalam reaksi kimia, katalis tidak dikonsumsi oleh reaksi.

### Katalis Heterogen

Katalis heterogen adalah katalis yang hadir dalam fase yang berbeda (biasanya padat) dari reaktan. Katalis tersebut umumnya berfungsi dengan memberikan permukaan aktif di mana reaksi dapat terjadi. Reaksi fasa gas dan cair yang dikatalis oleh katalis heterogen terjadi pada permukaan katalis daripada di dalam fasa gas atau cair.

Katalisis heterogen biasanya melibatkan proses berikut:

1. Adsorpsi reaktan ke permukaan katalis
2. Aktivasi reaktan yang teradsorpsi
3. Reaksi reaktan teradsorpsi
4. Desorpsi produk dari permukaan katalis



Gambar 1.6. Mekanisme reaksi katalis Ni  $C_2H_4 + H_2 \rightarrow C_2H_6$ . (a) Hidrogen diadsorpsi pada permukaan Ni, memutus ikatan H-H dan membentuk ikatan Ni-H. (b) Etilen diadsorpsi pada permukaan Ni, memutus ikatan C-C dan membentuk ikatan Ni-C. (c) Atom berdifusi melintasi permukaan Ni dan membentuk ikatan C-H baru ketika mereka bertabrakan. (d) Molekul  $C_2H_6$  terdesorpsi dari permukaan Ni.

Gambar 1.6 mengilustrasikan langkah-langkah mekanisme reaksi senyawa yang mengandung ikatan rangkap karbon-karbon dengan hidrogen pada katalis nikel. Nikel adalah katalis yang digunakan dalam hidrogenasi lemak dan minyak tak jenuh ganda (yang mengandung beberapa ikatan rangkap karbon-karbon) untuk menghasilkan lemak dan minyak jenuh (yang hanya mengandung ikatan tunggal karbon-karbon).

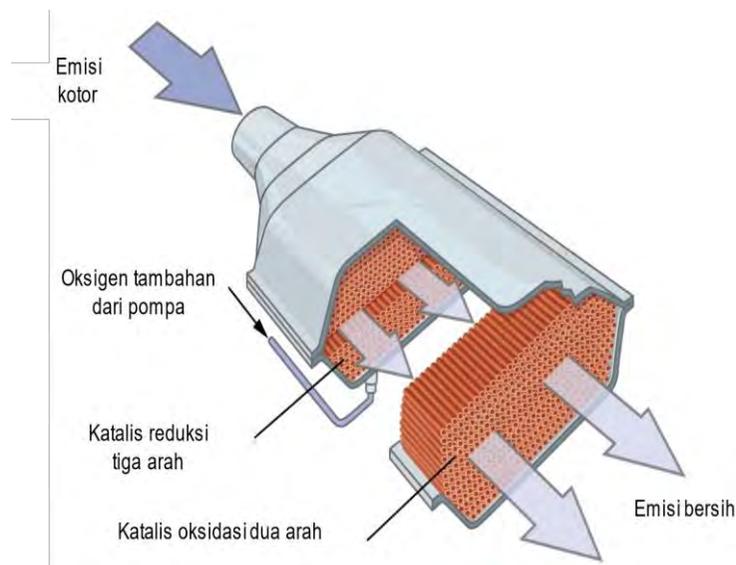
Banyak produk kimia penting dihasilkan melalui proses industri yang menggunakan katalis heterogen, termasuk amonia, asam nitrat, asam sulfat, dan metanol. Katalis heterogen juga digunakan dalam catalytic converter yang ditemukan pada sebagian besar mobil bertenaga bensin.

### **Katalis di Kehidupan Sehari-hari**

Beberapa aplikasi katalis telah disinggung pada bagian sebelumnya. Aplikasi katalis yang penting dalam kehidupan sehari-hari lainnya antara lain:

## Konverter Katalitik Mobil

Knalpot dari sebuah mobil mengandung banyak zat yang berbahaya bagi lingkungan. Sebagai akibat dari meningkatnya kekhawatiran mengenai potensi kerusakan atmosfer, pemerintah federal Amerika Serikat pada tahun 1970-an mengamanatkan adopsi catalytic converter, perangkat yang menggunakan katalis untuk mengubah polutan di knalpot menjadi zat yang kurang berbahaya. Dengan memanfaatkan campuran logam aktif katalitik yang dipilih dengan cermat, dimungkinkan untuk menghasilkan pembakaran sempurna dari semua senyawa yang mengandung karbon menjadi karbon dioksida sambil juga mengurangi keluaran nitrogen oksida.

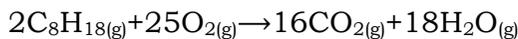
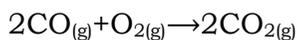
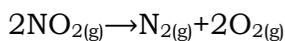


Gambar 1.7. Sebuah *catalytic converter* memungkinkan pembakaran semua senyawa yang mengandung karbon menjadi karbon dioksida, sementara pada saat yang sama mengurangi keluaran nitrogen oksida dan polutan lainnya dalam emisi dari mesin berbahan bakar bensin.

Platinum dan paladium adalah bahan yang disukai untuk catalytic converter, meskipun beberapa bahan nonlogam, seperti keramik, telah digunakan juga. Bagaimanapun, fungsi dari catalytic converter adalah untuk mengubah gas buang melalui reaksi

oksidasi-reduksi. Oksida nitrat direduksi menjadi oksigen molekuler dan nitrogen; pada saat yang sama, hidrokarbon dalam minyak bumi, bersama dengan karbon monoksida, dioksidasi untuk membentuk karbon dioksida dan air. Kadang-kadang zat pereduksi, seperti amonia, digunakan untuk membuat proses reduksi lebih efektif.

Konverter katalitik tiga arah yang paling modern memiliki permukaan yang dilapisi dengan katalis platinum-rhodium, yang mengkatalisis konversi oksida nitrat menjadi dinitrogen dan oksigen serta konversi karbon monoksida dan hidrokarbon seperti oktan menjadi karbon dioksida dan uap air:



Agar seefisien mungkin, sebagian besar catalytic converter dipanaskan terlebih dahulu oleh pemanas listrik. Hal ini untuk memastikan bahwa logam dalam katalis aktif sepenuhnya, bahkan sebelum knalpot mobil cukup panas untuk mempertahankan suhu reaksi yang sesuai.

### **Katalis Berbahaya di Atmosfer**

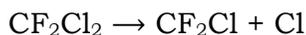
Sekitar waktu yang sama ketika pembuat mobil mulai meluncurkan model yang dilengkapi dengan catalytic converter, para ilmuwan dan masyarakat umum menjadi semakin khawatir tentang ancaman lain terhadap lingkungan. Di bagian atas atmosfer Bumi terdapat jejak ozon, bentuk molekul oksigen triatomik (tiga atom) yang melindungi planet ini dari sinar ultraviolet Matahari. Selama bagian akhir abad kedua puluh, sebuah lubang telah berkembang di lapisan ozon di atas Antartika,

---

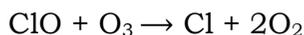
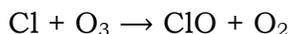
---

dan banyak ahli kimia mencurigai biang keladinya adalah klorofluorokarbon, atau CFC.

CFC telah lama digunakan dalam pendingin dan pendingin udara, dan sebagai propelan dalam semprotan aerosol. Karena mereka tidak beracun dan tidak korosif, mereka bekerja cukup baik untuk tujuan tersebut, tetapi fakta bahwa mereka secara kimia tidak reaktif memiliki efek samping yang sangat negatif. Alih-alih bereaksi dengan zat lain untuk membentuk senyawa baru, mereka diam berlama-lama di atmosfer bumi, dan akhirnya melayang ke ketinggian, di mana sinar ultraviolet menguraikannya. Masalah sebenarnya dimulai ketika atom klorin, yang diisolasi dari CFC, bertemu ozon.



Klorin bertindak sebagai katalis untuk mengubah ozon menjadi oksigen, yang hampir tidak seefektif ozon untuk melindungi Bumi dari sinar ultra-violet.



Klorin melakukannya dengan berinteraksi juga dengan oksigen monoatomik, atau atom tunggal, yang dengannya ia menghasilkan ClO, atau ion hipoklorit. Hasil akhir dari reaksi antara klorin, oksigen monoatomik, hipoklorit, dan ozon adalah produksi klorin, hipoklorit, dan oksigen diatomik—dengan kata lain, tidak ada lagi ozon. Diperkirakan bahwa satu atom klorin dapat menghancurkan hingga 1 juta molekul ozon per detik.

Karena kekhawatiran tentang bahaya terhadap lapisan ozon, sebuah perjanjian internasional yang disebut Protokol Montreal,

---

ditandatangani pada tahun 1996, melarang produksi CFC dan Freon pendingin yang mengandung CFC. Tetapi orang-orang masih membutuhkan pendingin untuk rumah dan mobil mereka, dan ini telah menyebabkan terciptanya pengganti—terutama hidroklorofluorokarbon (HCFC), senyawa organik yang tidak mengkatalisis ozon.

### **Contoh Katalis Lainnya**

Katalis muncul dalam sejumlah reaksi, baik alami maupun buatan. Misalnya, katalis digunakan dalam produksi industri amonia, asam nitrat (dihasilkan dari amonia), asam sulfat, dan zat lainnya. Proses amonia, yang dikembangkan pada tahun 1908 oleh ahli kimia Jerman Fritz Haber (1868-1934), sangat penting. Menggunakan besi sebagai katalis, Haber mampu menggabungkan nitrogen dan hidrogen di bawah tekanan tinggi untuk membentuk amonia—salah satu bahan kimia yang paling banyak digunakan di dunia.

Seribu delapan ratus sembilan puluh tujuh adalah tahun yang baik untuk katalis. Pada tahun itu, secara tidak sengaja ditemukan bahwa merkuri mengkatalisis reaksi yang menghasilkan pewarna indigo; juga pada tahun 1897, ahli kimia Prancis Paul Sabatier (1854-1941) menemukan bahwa nikel mengkatalisis produksi lemak yang dapat dimakan. Berkat penemuan Sabatier, nikel digunakan untuk mengubah minyak nabati yang tidak dapat dimakan menjadi margarin dan *shortening*.

Tahun lain yang baik untuk katalis—terutama yang terlibat dalam produksi polimer—adalah tahun 1953. Itu adalah tahun ketika kimiawan Jerman Karl Ziegler (1898-1973) menemukan katalis resin untuk produksi polietilen, yang menghasilkan produk yang

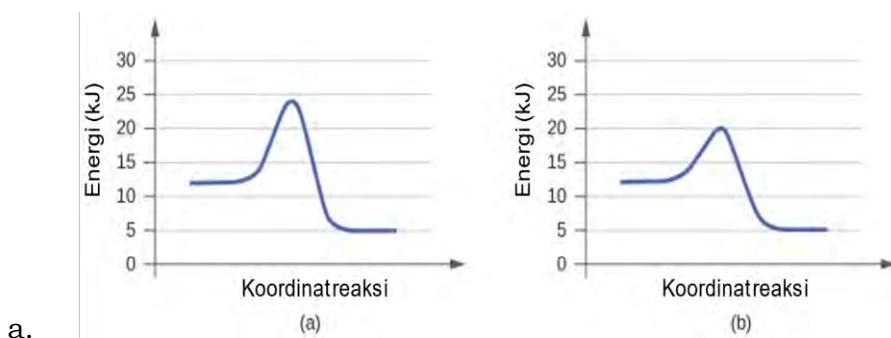
---

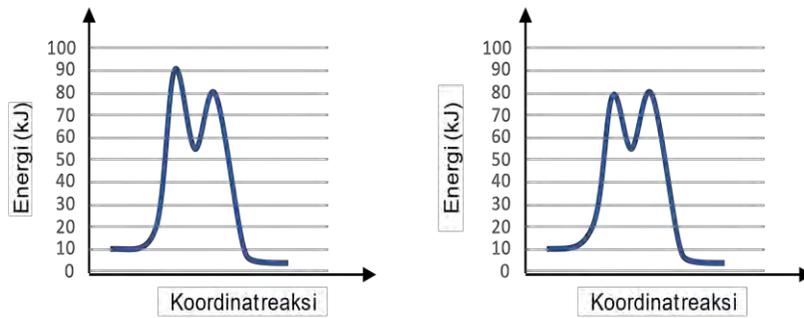
lebih baru dan lebih keras dengan titik leleh yang jauh lebih tinggi daripada polietilen yang diproduksi hingga saat itu. Juga pada tahun 1953, ahli kimia Italia Giulio Natta (1903-1979) mengadaptasi ide Ziegler, dan mengembangkan jenis plastik baru yang disebut polimer "isotaktik". plastik ini dapat diproduksi dengan mudah, dan berlimpah, melalui penggunaan katalis.

Salah satu pelajaran dalam kimia, atau bahkan ilmu apa pun, adalah bahwa ada banyak sekali hal yang memiliki efek luar biasa di alam yang belum mampu dicapai oleh ahli kimia. Tidak ada katalis buatan yang dapat bersaing dengan enzim, dan tidak ada penggunaan katalis di laboratorium yang dapat menandingi keagungan yang terjadi di Matahari. Seperti yang ditunjukkan oleh fisikawan Jerman-Amerika Hans Bethe (1906-) pada tahun 1938, reaksi hidrogen yang membentuk helium di permukaan Matahari dikatalisis oleh karbon—elemen yang sama, kebetulan, ditemukan di semua makhluk hidup di Bumi.

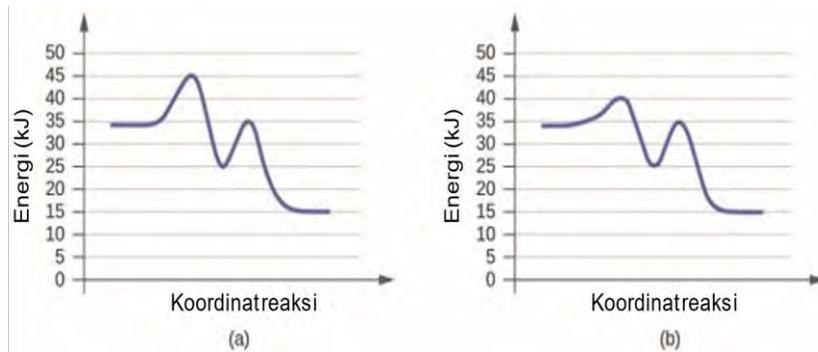
### Soal

1. Tentukan mana dari dua diagram di sini (keduanya untuk reaksi yang sama) yang melibatkan katalis, dan identifikasi energi aktivasi untuk reaksi yang menggunakan katalis:



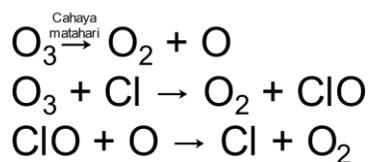


b.

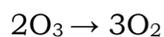


c.

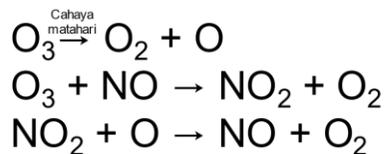
2. Atom klorin yang dihasilkan dari dekomposisi klorofluorometana, seperti  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ , mengkatalisis dekomposisi ozon di atmosfer. Salah satu mekanisme yang disederhanakan untuk dekomposisi adalah:



- a. Jelaskan mengapa atom klor merupakan katalis dalam transformasi fasa gas:

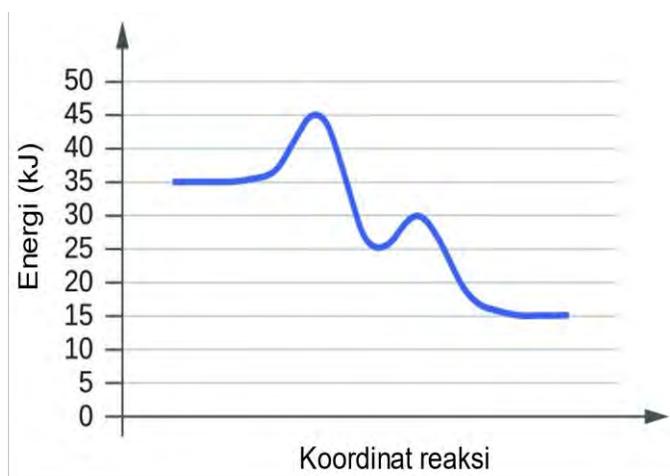


- b. Oksida nitrat juga terlibat dalam dekomposisi ozon dengan mekanisme:



Apakah NO merupakan katalis untuk dekomposisi?  
Jelaskan jawabanmu.

3. Untuk setiap diagram reaksi berikut, perkirakan energi aktivasi ( $E_a$ ) reaksi:



a.



b.

4. Berdasarkan diagram dalam soal no 3, jelaskan reaksi mana yang memiliki laju tercepat!
5. Banyak katalis logam, terutama katalis logam mulia yang dideposisikan sebagai lapisan tipis pada material dengan luas permukaan yang sangat luas. Mengapa ini adalah cara yang efektif untuk memanfaatkan logam mulia tersebut? Pilih semua jawaban yang menurut Anda benar.
  - Hanya material yang berada di permukaan yang bereaksi, sehingga tidak perlu membuat seluruh material terbuat dari katalis.
  - Jika katalis berada dalam keadaan lapisan tipis, jumlah katalis yang diperlukan tidak banyak. Hal ini menghemat biaya
  - Material tempat katalis dideposisikan menyebabkan reaksi alternatif terjadi yang akan menyebabkan berkurangnya produk reaksi yang diinginkan
  - Katalis yang dideposisikan hanya di permukaan tidak akan bekerja; seluruh material harus homogen katalis
6. Apakah aplikasi di kehidupan sehari-hari dari efek temperatur terhadap laju reaksi? Pilih semua jawaban yang menurut Anda benar
  - Menggoreng telur: bila wajannya sangat panas, telur akan matang dengan cepat. Jika wajannya tidak terlalu panas, telur matang lebih lambat.
  - Merebus telur. Jika menggunakan api besar, telur akan matang dengan cepat. Jika menggunakan api kecil, telur matang lebih lambat.

- Mencuci pakaian: Jika menggunakan air panas, pakaian akan lebih bersih. Jika menggunakan air dingin, pakaian mungkin tidak terlalu bersih



# BAB 2

## PEMISAHAN ZAT

### Tujuan Pembelajaran

Mahasiswa akan dapat:

1. Menjelaskan berbagai metode pemisahan.
2. Mengidentifikasi metode pemisahan mana yang paling cocok untuk suatu campuran tertentu.
3. Mengidentifikasi perubahan fisik apa yang terjadi selama proses pemisahan.

### Pengantar



Gambar 2.1. Metode menambang emas dengan panning

Pada akhir tahun 1840-an, ribuan pencari emas bergegas pergi ke California untuk menambang emas. Salah satu pendekatan yang dilakukan untuk mengisolasi emas dari tanah disebut "*panning*". Lumpur yang mengandung emas akan ditempatkan di suatu wadah lalu ditambah dengan air. Setelah tercampur sempurna,

wadah digoyang perlahan untuk menghilangkan bahan terlarut sementara emas yang lebih berat akan mengendap di dasar panci. Emas tersebut kemudian dipisahkan dari campuran tanah dan air.

Saat ini, seiring berjalannya waktu, metode pencarian emas terus berkembang menjadi lebih efektif dan efisien, tapi memiliki prinsip yang sama yaitu mengisolasi komponen yang diinginkan dari bahan lainnya. Dalam ilmu kimia yang lebih luas pun, kemampuan mengisolasi komponen yang diinginkan dari bahan lainnya amat penting untuk dapat mengkarakterisasi komponen tersebut lebih lanjut. Studi sistem biokimia, analisis lingkungan, penelitian farmasi - dan banyak bidang penelitian lainnya memerlukan metode pemisahan yang andal.

Campuran yang terdiri dari dua atau lebih jenis materi dapat hadir dalam jumlah yang bervariasi. Kita dapat memisahkan analit dan interferensi jika ada perbedaan yang signifikan dalam setidaknya satu sifat kimia atau fisiknya.

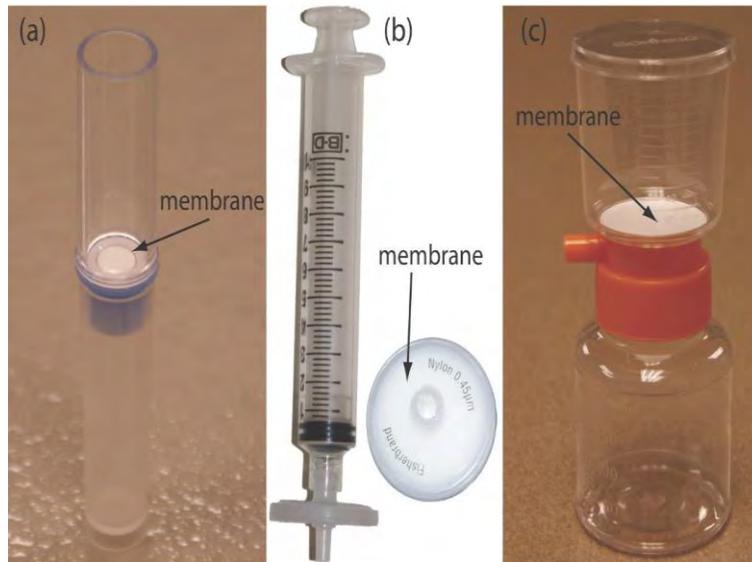
### **Pemisahan Berdasarkan Ukuran**

Ukuran adalah properti fisik paling sederhana yang dapat kita manfaatkan dalam pemisahan zat. Untuk mencapai pemisahan zat, kita dapat menggunakan media berpori yang hanya dapat dilewati oleh analit atau interferensi. Contoh pemisahan berdasarkan ukuran yaitu filtrasi dan dialisis

Dalam **filtrasi**, kita memisahkan pengganggu partikulat dari analit terlarut menggunakan filter dengan ukuran pori yang akan menahan pengganggu. Larutan yang melewati filter disebut filtrat, dan bahan yang tertahan oleh filter disebut retentat. Filtrasi gravitasi dan penyaringan hisap menggunakan kertas saring adalah teknik yang mungkin sudah Anda kenal. Filter membran

---

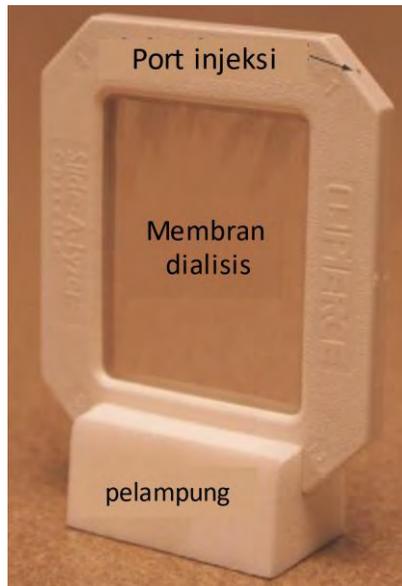
adalah metode pilihan untuk partikulat yang terlalu kecil untuk tertahan oleh kertas saring. Gambar 2 memberikan informasi tentang tiga jenis filter membran.



Gambar 2. 2. Contoh tiga jenis filter membran untuk memisahkan analit dan interferensi. (a) Filter sentrifugal untuk pemekatan dan penghilangan garam larutan makromolekul. Membran memiliki batas massa jenis molekul  $1 \times 10^6$  g/mol. (b) Filter spuit membran 0,45 m. Foto di sebelah kanan menunjukkan filter membran di casingnya. (c) Sistem filter sekali pakai dengan filter membran selulosa asetat.

**Dialisis** adalah contoh lain dari teknik pemisahan di mana ukuran digunakan untuk memisahkan analit dan interferensi. Membran dialisis biasanya dibuat menggunakan selulosa dan dibentuk menjadi tabung, tas, atau kaset. Gambar 3 menunjukkan contoh kaset dialisis yang tersedia secara komersial. Sampel disuntikkan ke dalam membran dialisis, yang ditutup rapat oleh gasket, dan unit ditempatkan dalam wadah berisi larutan dengan komposisi yang berbeda dari sampel. Jika terdapat perbedaan konsentrasi spesies pada kedua sisi membran, perbedaan konsentrasi yang dihasilkan memberikan kekuatan pendorong untuk terjadinya difusi melintasi membran. Sementara spesies kecil dengan bebas

melewati membran, spesies yang lebih besar tidak dapat melewatinya. Dialisis sering digunakan untuk memurnikan protein, hormon, dan enzim. Selama dialisis ginjal, produk sisa metabolisme, seperti urea, asam urat, dan kreatinin, dikeluarkan dari darah dengan melewatkannya melalui membran dialisis.



Gambar 2. 3. Contoh kaset dialisis. Membran dialisis dalam unit ini memiliki batas berat molekul 10.000 g/mol.

### **Pemisahan Berdasar Massa atau Berat Jenis**

Jika zat analit dan zat pengganggu memiliki massa atau densitas yang berbeda, maka pemisahan zat menggunakan sentrifugasi dapat dilakukan. Sampel ditempatkan dalam tabung centrifuge dan diputar pada kecepatan sudut tinggi, diukur dalam putaran per menit (rpm). Konstituen sampel mengalami gaya sentrifugal yang menariknya ke bagian bawah tabung sentrifugal. Spesies yang mengalami gaya sentrifugal terbesar memiliki laju sedimentasi tercepat dan merupakan yang pertama mencapai dasar tabung sentrifugal. Jika dua spesies memiliki kepadatan yang sama, pemisahan mereka didasarkan pada perbedaan massa, dengan

spesies yang lebih berat memiliki tingkat sedimentasi yang lebih besar. Jika spesies memiliki massa yang sama, maka spesies dengan kepadatan lebih besar memiliki laju sedimentasi terbesar.

Sentrifugasi merupakan teknik pemisahan yang penting dalam biokimia. Tabel 2.1., misalnya, mencantumkan kondisi untuk memisahkan komponen seluler yang dipilih. Kita dapat memisahkan lisosom dari komponen seluler lainnya dengan beberapa sentrifugasi diferensial, di mana kita membagi sampel menjadi residu padat dan larutan supernatan. Setelah menghancurkan sel, larutan disentrifugasi selama 20 menit pada 15.000xg (gaya sentrifugal yang memiliki besar 15.000 kali gaya gravitasi bumi), meninggalkan residu padat membran sel dan mitokondria. Supernatan, yang mengandung lisosom, diisolasi dengan mendekantasinya dari residu dan kemudian disentrifugasi selama 30 menit pada 30.000xg, meninggalkan residu padat lisosom. Gambar 2.4 menunjukkan mesin sentrifugal umum yang mampu menghasilkan gaya sentrifugal yang diperlukan untuk pemisahan biokimia.

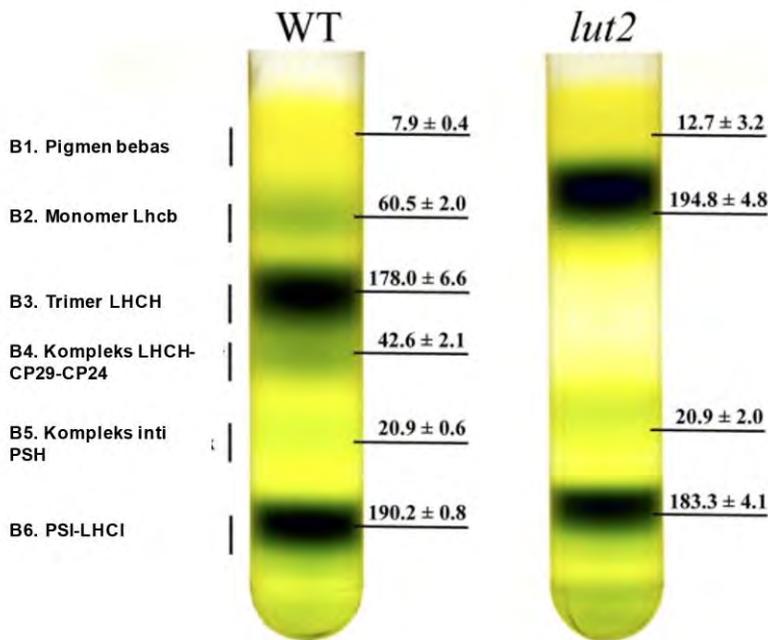
Tabel 2.1 Kondisi untuk Memisahkan Komponen Seluler yang Dipilih dengan Sentrifugasi

<b>Komponen</b>	<b>Gaya sentrifugal (xg)</b>	<b>Waktu (menit)</b>
Sel eukaryotik	1000	5
Membran sel; nuklei	4000	10
Mitokondria; sel bakteri	15.000	20
Lisosom; membran bakterdi	30.000	30
Ribosom	100.000	180



Gambar 2.4 Bench-top centrifuge mampu mencapai kecepatan hingga 14000 rpm dan gaya sentrifugal  $20800\times g$ . Centrifuge khusus ini dapat didinginkan, memungkinkan sampel didinginkan hingga suhu  $-4^{\circ}\text{C}$ .

Pendekatan alternatif untuk sentrifugasi diferensial adalah sentrifugasi gradien kepadatan. Untuk menyiapkan gradien kerapatan sukrosa, misalnya, larutan dengan konsentrasi sukrosa yang lebih kecil—dan, dengan demikian, kerapatan lebih rendah—dilapiskan dengan hati-hati pada larutan dengan konsentrasi sukrosa yang lebih tinggi. Proses ini diulangi beberapa kali, hingga tabung centrifuge terisi dengan gradien kepadatan multi-layer. Sampel ditempatkan di atas gradien densitas dan disentrifugasi menggunakan gaya yang lebih besar dari  $150.000\times g$ . Selama sentrifugasi, masing-masing komponen sampel bergerak melalui gradien hingga mencapai posisi di mana kerapatannya sesuai dengan larutan sukrosa di sekitarnya. Setiap komponen diisolasi sebagai pita terpisah yang diposisikan di mana kerapatannya sama dengan kerapatan lokal dalam gradien. Gambar 5 memberikan contoh sentrifugasi densitas sukrosa yang khas untuk memisahkan membran tilakoid tanaman.

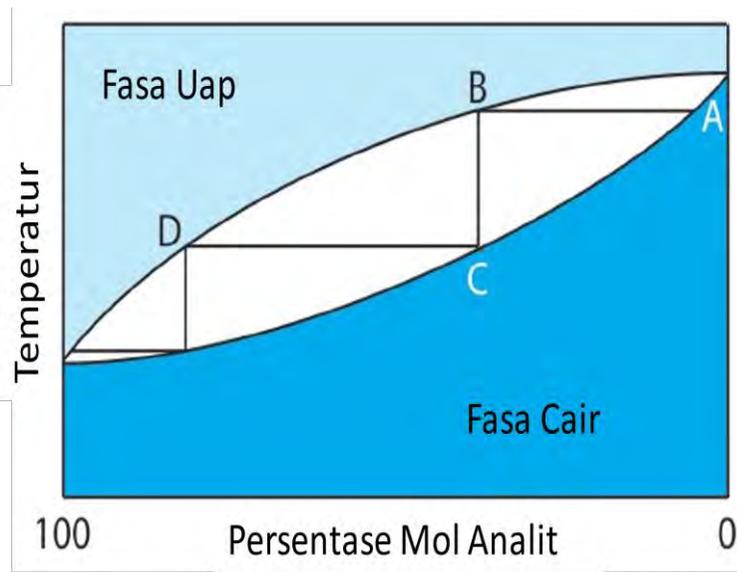


Gambar 2. 5 Contoh sentrifugasi gradien densitas sukrosa membran tilakoid dari tumbuhan *wild type* (WT) dan *lut2*. Membran tilakoid diekstraksi dari daun tanaman dan dipisahkan dengan sentrifugasi dalam gradien sukrosa 0,1-1 M selama 22 jam pada 280000xg dan pada 4°C. Enam pita dan kandungan klorofilnya ditampilkan. Diadaptasi dari Dall'Osto, L.; Lico, C.; Alric, J.; Giuliano, G.; Havaux, M.; Bassi, R. BMC Plant Biology 2006, 6:32.

### Pemisahan Berdasar Perubahan Fasa

Jika analit dan zat pengganggu adalah cairan yang dapat bercampur, pemisahan zat dengan distilasi dimungkinkan jika titik didihnya berbeda cukup jauh. Gambar 2.6 menunjukkan distilasi sebagai plot suhu versus komposisi fase uap dan fase cair campuran. Campuran cair awal (titik A), mengandung lebih banyak interferensi daripada analit. Ketika larutan ini dibawa ke titik didihnya, fase uap dalam kesetimbangan dengan fase cair diperkaya dengan analit (titik B). Garis horizontal yang menghubungkan titik A dan B menunjukkan kesetimbangan penguapan ini. Mengembangkan fase uap di titik B, dengan menurunkan suhu, menciptakan fase cair baru dengan komposisi

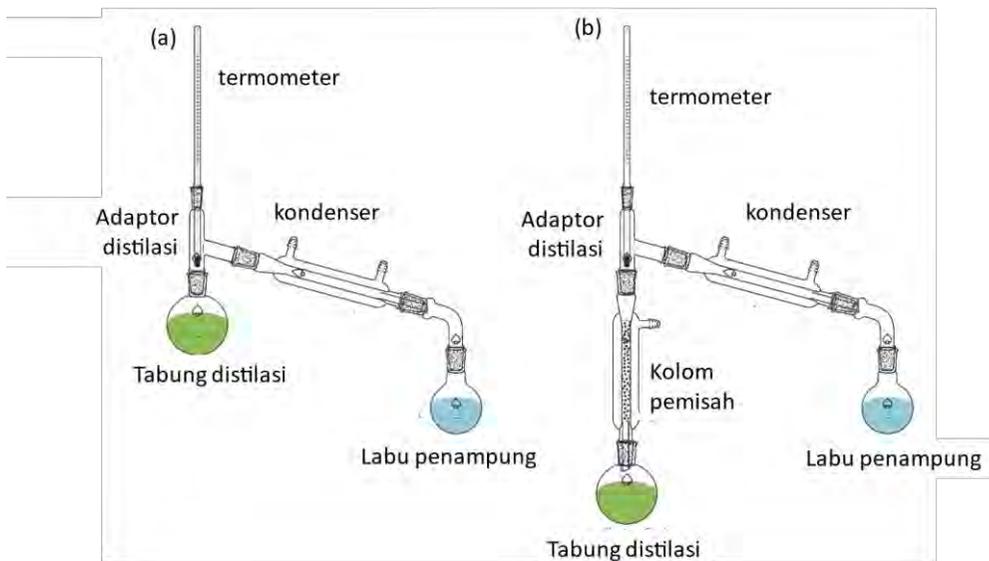
yang identik dengan yang ada di fase uap (titik C). Garis vertikal yang menghubungkan titik B dan C menunjukkan kesetimbangan kondensasi ini. Fasa cair pada titik C memiliki titik didih yang lebih rendah daripada campuran aslinya, dan berada dalam kesetimbangan dengan fasa uap pada titik D. Proses penguapan dan kondensasi berulang ini secara bertahap memisahkan analit dan zat pengganggu.



Gambar 2.6. Diagram titik didih versus komposisi untuk larutan mendekati ideal yang terdiri dari analit dengan titik didih rendah dan zat pengganggu dengan titik didih tinggi. Garis horizontal mewakili kesetimbangan penguapan dan garis vertikal mewakili kesetimbangan kondensasi.

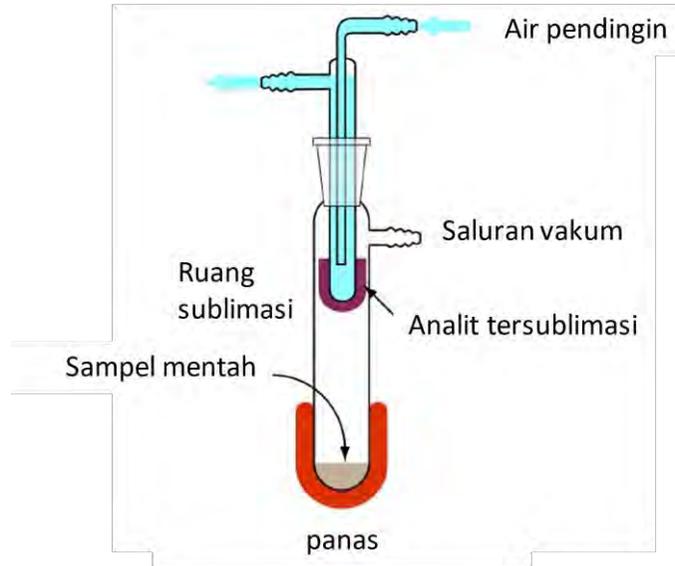
Dua set-up eksperimental untuk distilasi ditunjukkan pada Gambar 2.7. Peralatan distilasi sederhana yang ditunjukkan Gambar 2.7a hanya berguna untuk memisahkan analit (atau interferensi) yang mudah menguap dari interferensi (atau analit) yang tidak mudah menguap, atau untuk memisahkan analit dan interferensi yang titik didihnya berbeda lebih dari  $150^{\circ}\text{C}$ . Pemisahan yang lebih efisien dicapai dengan menggunakan peralatan distilasi fraksional pada Gambar 2.7b. Pengemasan

kolom fraksinasi dengan bahan luas permukaan yang tinggi, seperti spons baja atau manik-manik kaca, memberikan lebih banyak kesempatan untuk proses penguapan dan kondensasi berulang yang diperlukan untuk menghasilkan pemisahan yang lengkap.



Gambar 2.7 Pengaturan eksperimental yang umum untuk (a) distilasi sederhana, dan (b) distilasi fraksional

Jika sampel berupa padatan, **sublimasi** dapat menjadi metode pemisahan analit dan interferensi yang berguna. Sampel dipanaskan pada suhu dan tekanan di bawah titik tripel analit, memungkinkannya untuk menguap tanpa melewati fasa cair. Kondensasi uap memulihkan analit yang dimurnikan (Gambar 2.8). Sebuah contoh analitis yang berguna dari sublimasi adalah isolasi asam amino dari fosil cangkang moluska dan sedimen laut dalam [Glavin, D. P.; Bada, J.L. Anal. Chem 1998, 70, 3119–3122].



Gambar 2.8. Pengaturan eksperimen yang umum untuk sublimasi. Sampel ditempatkan di ruang sublimasi. Pemanasan sampel menyebabkan analit menguap dan menyublim ke pipa dingin, yang didinginkan menggunakan air dingin.

Rekristalisasi adalah metode lain untuk memurnikan padatan. Pelarut dipilih di mana kelarutan analit signifikan ketika pelarut panas dan minimal ketika pelarut dingin. Pengganggu harus kurang larut dalam pelarut panas daripada analit atau hadir dalam jumlah yang jauh lebih kecil. Setelah memanaskan sebagian pelarut dalam labu Erlenmeyer, sejumlah kecil sampel ditambahkan sampai sampel yang tidak larut terlihat. Pelarut panas tambahan ditambahkan sampai sampel larut kembali, atau sampai hanya pengotor yang tidak larut yang tersisa. Proses penambahan sampel dan pelarut ini diulangi sampai seluruh sampel ditambahkan ke dalam labu Erlenmeyer. Setiap kotoran yang tidak larut dihilangkan dengan menyaring larutan panas. Larutan dibiarkan mendingin secara perlahan, yang mendorong pertumbuhan kristal murni yang besar, dan kemudian didinginkan dalam penangas es untuk meminimalkan kehilangan kelarutan. Sampel yang dimurnikan diisolasi dengan penyaringan dan dibilas

untuk menghilangkan kotoran yang larut. Terakhir, sampel dikeringkan untuk menghilangkan sisa pelarut. Pemurnian lebih lanjut, jika perlu, dilakukan dengan rekristalisasi tambahan.

### **Metode Pemisahan Tingkat Lanjut**

Pada bagian sebelumnya kita telah mempelajari berbagai macam teknik dasar untuk memisahkan zat. Teknik-teknik dasar tersebut menggunakan prinsip fisika yang seharusnya telah kalian pelajari di tingkat sekolah menengah. Pada bagian ini akan dibahas teknik-teknik pemisahan yang menggunakan prinsip fisika tingkat lanjut.

#### *Electroforesis*

Elektroforesis adalah istilah umum yang menggambarkan migrasi dan pemisahan partikel bermuatan (ion) di bawah pengaruh medan listrik. Untuk memahami prinsip kerjanya, kita ingat lagi mengenai medan listrik. Medan listrik adalah medan yang mengelilingi partikel bermuatan listrik dan memberikan gaya pada semua partikel bermuatan lain di medan tersebut, baik menarik atau menolaknya. Medan listrik juga mengacu pada medan untuk sistem partikel bermuatan. Medan listrik berasal dari muatan listrik, atau dari medan magnet yang berubah terhadap waktu. Medan listrik dan medan magnet keduanya merupakan manifestasi dari gaya elektromagnetik, salah satu dari empat gaya fundamental (atau interaksi) alam.

Mari kita perhatikan sebuah muatan titik  $Q$  yang ditempatkan dalam ruang hampa, di titik asal  $O$ . Jika kita menempatkan muatan titik lain  $q$  pada titik  $P$ , di mana  $OP = r$ , maka muatan  $Q$  akan memberikan gaya pada  $q$  sesuai dengan hukum Coulomb. Kita mungkin bertanya: Jika muatan  $q$  dihilangkan, lalu apa yang tersisa di sekitarnya? Apakah tidak ada apa-apa? Jika tidak ada

---

apa pun di titik P, lalu bagaimana gaya bekerja ketika kita menempatkan muatan  $q$  di P. Untuk menjawab pertanyaan seperti itu, para ilmuwan awal memperkenalkan konsep medan. Menurut ini, kita mengatakan bahwa muatan  $Q$  menghasilkan medan listrik ke semua arah di sekitarnya. Ketika muatan lain  $q$  dibawa ke suatu titik P, medan di sana bekerja padanya dan menghasilkan gaya. Medan listrik yang dihasilkan oleh muatan  $Q$  pada titik  $r$  diberikan sebagai:

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{r} \quad (2.1)$$

dimana  $\hat{r} = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$ , adalah vektor satuan dari titik 0 ke titik  $r$ . Jadi, Persamaan di atas menentukan nilai medan listrik untuk setiap nilai vektor posisi  $r$ . Sehingga kita memperoleh gaya  $F$  yang diberikan oleh muatan  $Q$  pada muatan  $q$ , sebagai

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2} \hat{r} \quad (2.2)$$

Perhatikan bahwa muatan  $q$  juga memberikan gaya yang sama besar dan berlawanan arah pada muatan  $Q$ . Gaya elektrostatik antara muatan  $Q$  dan  $q$  dapat dilihat sebagai interaksi antara muatan  $q$  dan medan listrik  $Q$  dan sebaliknya. Jika kita menyatakan posisi muatan  $q$  dengan vektor  $r$ , ia mengalami gaya  $F$  yang sama dengan muatan  $q$  dikalikan dengan medan listrik  $E$  di lokasi  $q$ . Dengan demikian,

$$F(r) = qE(r) \quad (2.3)$$

Persamaan di atas menyebabkan satuan dari medan listrik adalah  $N/C$ .

---

Beberapa catatan penting dapat dibuat di sini:

1. Dari Persamaan (2.3), kita dapat menyimpulkan bahwa jika  $q$  bernilai  $1\text{ C}$ , medan listrik karena muatan  $Q$  secara numerik sama dengan gaya yang diberikan olehnya. Jadi, medan listrik akibat muatan  $Q$  pada suatu titik dalam ruang dapat didefinisikan sebagai gaya yang akan dialami oleh muatan positif satuan jika ditempatkan pada titik itu. Muatan  $Q$  yang menghasilkan medan listrik disebut muatan sumber dan muatan  $q$  yang menguji pengaruh muatan sumber disebut muatan uji. Perhatikan bahwa muatan sumber  $Q$  harus tetap pada lokasi aslinya. Namun, jika muatan  $q$  dibawa ke sembarang titik di sekitar  $Q$ ,  $Q$  sendiri pasti mengalami gaya listrik karena  $q$  dan akan cenderung bergerak. Jalan keluar dari masalah ini adalah membuat  $q$  menjadi sangat kecil. Gaya  $F$  kemudian cukup kecil untuk diabaikan tetapi rasio  $F/q$  terhingga dan medan listrik terdefiniskan sebagai:

$$E = \left( \frac{F}{q} \right) \quad (2.4)$$

Cara praktis untuk mengatasi masalah ini (menjaga  $Q$  tidak terganggu keberadaan  $q$ ) adalah dengan menahan  $Q$  di tempatnya dengan gaya lain yang tidak ditentukan. Ini mungkin terdengar aneh tetapi sebenarnya inilah yang terjadi dalam praktiknya. Ketika kita mempertimbangkan gaya listrik pada muatan uji  $q$  karena lembaran planar bermuatan, muatan pada lembaran tersebut ditahan pada tempatnya oleh gaya yang disebabkan oleh konstituen bermuatan yang tidak ditentukan di dalam lembaran.

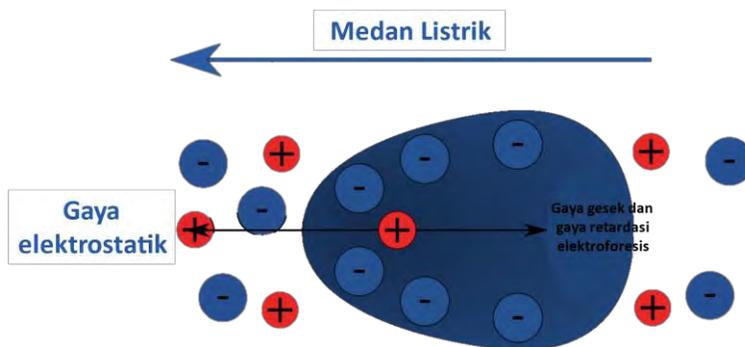
2. Perhatikan bahwa medan listrik  $E$  karena  $Q$ , meskipun didefinisikan secara operasional dalam beberapa muatan uji  $q$ , tidak tergantung pada  $q$ . Hal ini karena  $F$  sebanding dengan  $q$ , sehingga rasio  $F/q$  tidak bergantung pada  $q$ . Gaya  $F$  pada muatan  $q$  akibat muatan  $Q$  bergantung pada lokasi tertentu dari muatan  $q$  yang dapat bernilai sembarang di ruang sekitar muatan  $Q$ . Jadi, medan listrik  $E$  akibat  $Q$  juga bergantung pada koordinat ruang  $r$ . Untuk posisi muatan  $q$  yang berbeda di seluruh ruang, kita mendapatkan nilai medan listrik  $E$  yang berbeda. Medan listrik berada di setiap titik dalam ruang tiga dimensi.
3. Untuk muatan positif, medan listrik akan mengarah ke luar secara radial dari muatan. Sebaliknya, jika muatan sumber negatif, vektor medan listrik di setiap titik mengarah ke dalam secara radial.
4. Karena besarnya gaya  $F$  pada muatan  $q$  akibat muatan  $Q$  hanya bergantung pada jarak  $r$  muatan  $q$  dari muatan  $Q$ , besar medan listrik  $E$  juga hanya bergantung pada jarak  $r$ . Jadi pada jarak yang sama dari muatan  $Q$ , besar medan listriknya  $E$  adalah sama. Besarnya medan listrik  $E$  karena muatan titik dengan demikian sama pada bola dengan muatan titik di pusatnya; dengan kata lain, medan listrik memiliki simetri bola

Fenomena elektrokinetik dari elektroforesis diamati untuk pertama kalinya pada tahun 1807 oleh profesor Peter Ivanovich Strakhov dan Ferdinand Frederic Reuss di Universitas Moskow, yang memperhatikan bahwa penerapan medan listrik konstan menyebabkan partikel tanah liat yang terdispersi dalam air bermigrasi. Hal ini disebabkan oleh adanya interaksi antarmuka bermuatan antara permukaan partikel dan cairan sekitarnya. Hal

---

ini adalah dasar untuk teknik analisis yang digunakan dalam kimia untuk memisahkan molekul berdasarkan ukuran, muatan, atau afinitas ikatan.

Elektroforesis digunakan di laboratorium untuk memisahkan makromolekul berdasarkan ukurannya. Teknik ini menerapkan muatan negatif sehingga protein bergerak menuju muatan positif. Elektroforesis digunakan secara luas dalam analisis DNA, RNA dan protein.



Gambar 2.9. Ilustrasi Elektroforesis

Elektroforesis terjadi karena partikel yang terdispersi dalam fluida hampir selalu membawa muatan permukaan listrik. Medan listrik memberikan gaya Coulomb elektrostatis pada partikel melalui muatan ini. Dari teori lapisan ganda diketahui bahwa semua muatan permukaan dalam fluida disaring dengan lapisan difus. Lapisan difus ini memiliki nilai muatan mutlak yang sama, tetapi dengan tanda yang berlawanan dari muatan permukaan. Medan listrik menginduksi gaya pada lapisan difus, serta pada muatan permukaan. Nilai total gaya ini sama dengan gaya yang disebutkan pertama, tetapi arahnya berlawanan. Namun, hanya sebagian dari gaya ini yang diterapkan pada partikel. Ini sebenarnya diterapkan pada ion-ion di lapisan difus. Ion-ion ini berada pada jarak tertentu

dari permukaan partikel. Mereka mentransfer sebagian dari gaya elektrostatik ini ke permukaan partikel melalui tegangan viskos. Bagian dari gaya yang diterapkan pada tubuh partikel ini disebut gaya retardasi elektroforesis (ERF-*electrophoresis retardation force*). Semua gaya ini diseimbangkan dengan gesekan hidrodinamik, yang mempengaruhi semua benda yang bergerak dalam cairan kental dengan bilangan Reynolds rendah.

$$F_{total} = 0 = F_{listrik} + F_{gesek} + F_{ERF} \quad (2.5)$$

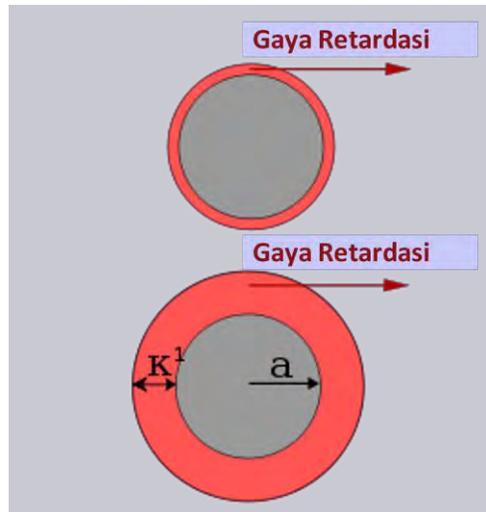
Mempertimbangkan hambatan pada partikel yang bergerak karena viskositas pendispersi, dalam kasus bilangan Reynolds rendah dan kuat medan listrik  $E$  tidak terlalu kuat, kecepatan aliran partikel terdispersi  $v$  sebanding dengan medan yang diterapkan, yang menyebabkan mobilitas elektroforesis,  $\mu_e$ , didefinisikan sebagai

$$\mu_e = \frac{v}{E} \quad (2.6)$$

Teori elektroforesis yang paling terkenal dan banyak digunakan dikembangkan pada tahun 1903 oleh Smoluchowski:

$$\mu_e = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \zeta}{\eta} \quad (2.7)$$

dimana  $\epsilon_r$  adalah konstanta dielektrik medium dispersi,  $\epsilon_0$  adalah permitivitas ruang hampa ( $C^2 N^{-1} m^{-2}$ ),  $\eta$  adalah viskositas dinamis medium dispersi (Pa·s), dan  $\zeta$  adalah potensial zeta (yaitu, elektrokinetik potensial bidang selip pada lapisan ganda, satuan mV atau V).



Gambar 2.10. Ilustrasi gaya retardasi elektroforesis

Teori Smoluchowski sangat bermanfaat karena bekerja untuk partikel terdispersi dalam bentuk apa pun dan pada konsentrasi apa pun. Namun hal memiliki batasan validitasnya. Misalnya, tidak termasuk panjang Debye  $\kappa^{-1}$  (satuan m). Namun, panjang Debye penting untuk elektroforesis. Peningkatan ketebalan lapisan ganda menyebabkan titik gaya retardasi berada lebih jauh dari permukaan partikel. Semakin tebal lapisan ganda, semakin kecil gaya retardasinya.

Analisis teoretis terperinci membuktikan bahwa teori Smoluchowski hanya valid untuk DL yang cukup tipis, ketika jari-jari partikel  $a$  jauh lebih besar daripada panjang Debye:

$$a\kappa \gg 1$$

Model "lapisan ganda tipis" ini menawarkan penyederhanaan yang luar biasa tidak hanya untuk teori elektroforesis tetapi untuk banyak teori elektrokinetik lainnya. Model ini berlaku untuk sebagian besar sistem air, di mana panjang Debye biasanya hanya

---

beberapa nanometer. Model ini tidak berlaku untuk nano-koloid dalam larutan dengan kekuatan ion yang dekat dengan air.

Teori Smoluchowski juga mengabaikan kontribusi dari konduktivitas permukaan. Hal ini dinyatakan dalam teori modern sebagai kondisi bilangan Dukhin kecil:

$$Du \ll 1$$

Dalam upaya memperluas jangkauan validitas teori elektroforesis, kasus asimtotik yang berlawanan dipertimbangkan, ketika panjang Debye lebih besar dari jari-jari partikel:

$$a\kappa > 1$$

Di bawah kondisi "lapisan ganda tebal" ini, Hückel memprediksi hubungan berikut untuk mobilitas elektroforesis:

$$\mu_e = \frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0\zeta}{3\eta} \quad (2.8)$$

Model ini dapat berguna untuk beberapa nanopartikel dan cairan non-polar, di mana panjang Debye jauh lebih besar daripada dalam kasus biasa. Ada banyak aplikasi elektroforesis untuk pengukuran dan berbagai operasi dengan partikulat

#### Pengukuran

Elektroforesis digunakan untuk mempelajari sifat-sifat partikel terdispersi. Khususnya, untuk mengukur potensial zeta. Ada beberapa variasi yang berbeda dari teknik berbasis elektroforesis. Yang paling dikenal adalah: mikroelektroforesis dan elektroforesis hamburan cahaya. Metode-metode ini dijelaskan secara rinci dalam "Fundamentals of Interface and Colloid Science", oleh Lyklema.

## Arial

Elektroforesis gel merupakan aplikasi elektroforesis dalam biologi molekuler. Makromolekul biologis – biasanya protein, DNA, atau RNA – dimuat pada gel dan dipisahkan berdasarkan mobilitas elektroforesisnya. (Gel sangat menghambat mobilitas semua molekul yang ada.)

## Tampilan elektroforesis

Tampilan elektroforesis (*Electrophoretic displays*-EPD's) adalah tampilan informasi yang membentuk gambar dengan gerakan elektroforesis partikel pigmen berwarna yang bermuatan. Produk yang menggabungkan tampilan elektroforesis termasuk pembaca buku elektronik Sony Librie, dan tablet surat kabar elektronik iRex iLiad, keduanya menggunakan film elektroforesis yang diproduksi oleh E Ink Corporation.

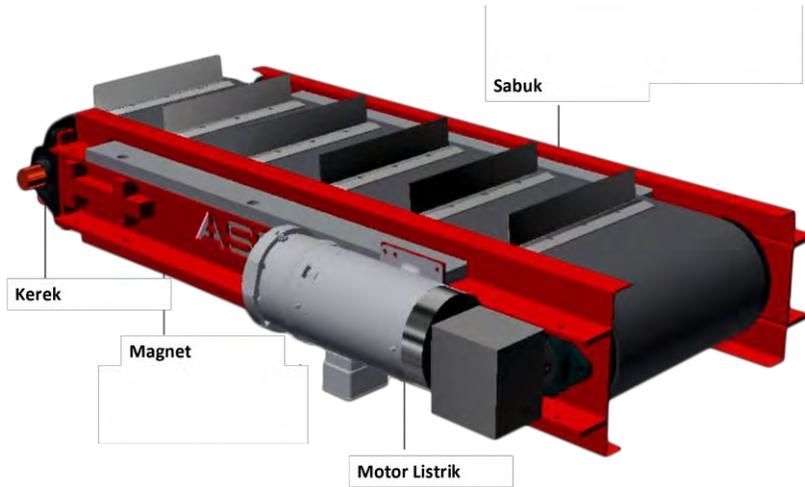
## Sidik jari elektroforesis

Elektroforesis juga digunakan dalam proses sidik jari DNA. Segmen DNA tertentu yang sangat bervariasi di antara manusia dipotong di tempat pengenalan oleh enzim restriksi (restriksi endonuklease). Setelah fragmen DNA yang dihasilkan dijalankan melalui elektroforesis, jarak antara pita diukur dan dicatat sebagai "sidik jari" DNA.

## Deposisi elektroforesis

Pelapis, seperti cat atau keramik, dapat diterapkan dengan deposisi elektroforesis. Teknik ini bahkan dapat digunakan untuk pencetakan 3-D.

## Pemisahan Magnetik



Gambar 2.11. Mesin Pemisahan Magnetik

Pemisahan magnetik adalah proses pemisahan komponen campuran dengan menggunakan magnet untuk menarik zat magnetik. Proses yang digunakan untuk pemisahan magnetik memisahkan zat non-magnetik dari yang bersifat magnetis. Teknik ini berguna untuk beberapa mineral tertentu yang bersifat feromagnetik (mineral yang mengandung besi, nikel, dan kobalt) dan paramagnetik. Sebagian besar logam, termasuk emas, perak, dan aluminium, bersifat nonmagnetik.

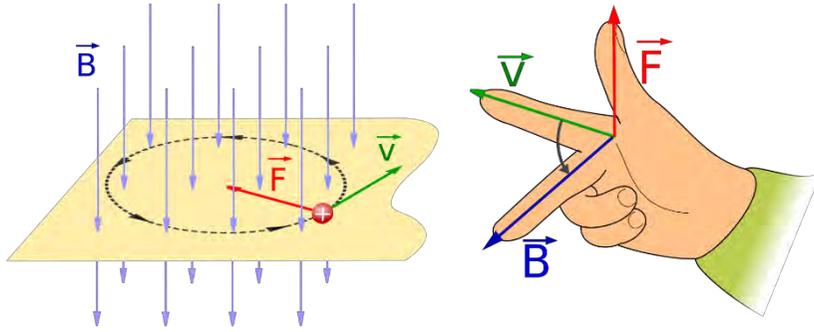
Pemisahan magnetik menggunakan prinsip fisika medan magnet. Medan magnet adalah medan vektor yang menggambarkan pengaruh magnet terhadap muatan listrik yang bergerak, arus listrik, dan material magnetik. Muatan yang bergerak dalam medan magnet mengalami gaya yang tegak lurus terhadap kecepatannya sendiri dan terhadap medan magnet. Medan magnet dari magnet permanen akan menarik bahan feromagnetik seperti besi, dan menarik atau menolak magnet lain. Selain itu, medan magnet yang bervariasi menurut lokasi akan memberikan gaya pada berbagai bahan non-magnetik dengan mempengaruhi gerakan elektron

atom terluarnya. Medan magnet mengelilingi bahan yang dimagnetisasi, dan diciptakan oleh arus listrik seperti yang digunakan dalam elektromagnet, dan oleh medan listrik yang bervariasi dalam waktu. Karena kekuatan dan arah medan magnet dapat bervariasi menurut lokasi, medan magnet dapat dijelaskan secara matematis oleh fungsi yang menetapkan vektor ke setiap titik ruang, yang disebut medan vektor.

Vektor medan magnet  $B$  di sembarang titik dapat didefinisikan sebagai vektor yang, bila digunakan dalam hukum gaya Lorentz, memprediksi gaya pada partikel bermuatan di titik tersebut dengan tepat.

$$\text{Gaya Lorentz:} \quad F = q(E + v \times B) \quad (2.9)$$

Di sini  $F$  adalah gaya pada partikel,  $q$  adalah muatan listrik partikel,  $v$ , adalah kecepatan partikel, dan  $\times$  menunjukkan perkalian silang. Arah gaya pada muatan dapat ditentukan dengan mnemonik yang dikenal sebagai aturan tangan kanan (lihat Gambar 2.12). Menggunakan tangan kanan, menunjuk ibu jari ke arah arus, dan jari-jari di arah medan magnet, gaya yang dihasilkan pada muatan menunjuk keluar dari telapak tangan. Gaya pada partikel bermuatan negatif berlawanan arah. Jika kecepatan dan muatan dibalik maka arah gaya tetap sama. Oleh karena itu pengukuran medan magnet (dengan sendirinya) tidak dapat membedakan apakah ada muatan positif yang bergerak ke kanan atau muatan negatif yang bergerak ke kiri. (Kedua kasus ini menghasilkan arus yang sama.)



Gambar 2. 12. Ilustrasi Medan Magnet pada Partikel Bermuatan  
Istilah pertama dalam persamaan Lorentz berasal dari teori elektrostatika, dan mengatakan bahwa partikel bermuatan  $q$  dalam medan listrik  $E$  mengalami gaya listrik:

$$F_{listrik} = qE \quad (2.10)$$

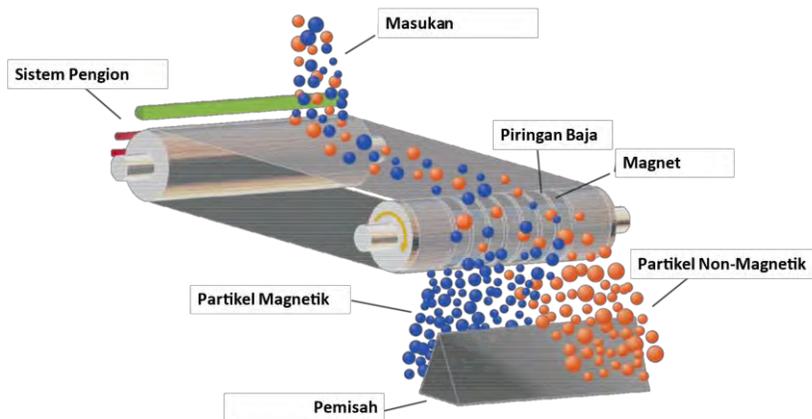
Suku kedua adalah gaya magnet:

$$F_{magnet} = q(v \times B) \quad (2.11)$$

Menggunakan definisi perkalian silang, gaya magnet juga dapat ditulis sebagai persamaan skalar:

$$F_{magnet} = qvB\sin\theta \quad (2.12)$$

di mana  $F_{magnet}$ ,  $v$ , dan  $B$  adalah besaran skalar dari masing-masing vektor, dan  $\theta$  adalah sudut antara kecepatan partikel dan medan magnet. Vektor  $B$  didefinisikan sebagai medan vektor yang diperlukan untuk membuat hukum gaya Lorentz menggambarkan dengan benar gerakan partikel bermuatan.



Gambar 2.13. Ilustrasi Prinsip Kerja Pemisah Magnetik

Menggunakan prinsip medan magnetik di atas, Michael Faraday menemukan bahwa ketika suatu zat dimasukkan ke dalam lingkungan magnetis, intensitas lingkungan diubah olehnya. Dengan informasi ini, ia menemukan bahwa material yang berbeda dapat dipisahkan dengan sifat magnetiknya. Tabel 2.2. di bawah ini menunjukkan mineral feromagnetik dan paramagnetik umum serta intensitas medan yang diperlukan untuk memisahkan mineral.

Tabel 2. 2. Daftar Mineral Umum serta Intensitas Medan Magnetiknya

	<i>Mineral</i>	<i>Rumus</i>	<i>Kuat Medan (T)</i>
<i>Ferromagnetik</i>	Magnetite	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	0,1
	Pyrrhotite	$\text{Fe}_7\text{S}_8$	0,05-0,4
	Ilmenite	$\text{FeTiO}_3$	0,8-1,6
	Siderite	$\text{FeCO}_3$	0,9-1,8
<i>Paramagnetik</i>	Chromite	$\text{FeCr}_2\text{O}_4$	1-1,6
	Hematite	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,2-1,8
	Wolframite	$(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$	1,2-1,8
	Tourmaline		1,6-2,0

Pada tahun 1860-an, pemisahan magnetik mulai dikomersialkan. Ia digunakan untuk memisahkan besi dari kuningan. Setelah tahun 1880-an, bahan feromagnetik mulai dipisahkan secara magnetis. Pada tahun 1900-an, pemisahan magnetik intensitas

tinggi diresmikan yang memungkinkan pemisahan material paramagnetik. Setelah Perang Dunia Kedua, sistem yang paling umum digunakan adalah elektromagnet. Teknik ini digunakan di tempat sampah. Pemisahan magnetik dikembangkan lagi pada akhir 1970-an dengan teknologi baru yang diresmikan.

Di tambang di mana wolframite bercampur dengan kasiterit, seperti tambang South Crofty dan East Pool di Cornwall atau dengan bismut seperti di tambang Shepherd dan Murphy di Moina, Tasmania, pemisahan magnetik digunakan untuk memisahkan bijih. Di tambang ini, perangkat yang disebut Pemisah Magnetik Wetherill (ditemukan oleh John Price Wetherill, 1844–1906) digunakan. Dalam mesin ini, bijih mentah, setelah kalsinasi diumpankan ke sabuk konveyor yang dilewatkan di bawah dua pasang elektroda elektromagnet di mana sabuk selanjutnya berjalan tepat ke sabuk umpan. Sepasang elektroda pertama memiliki elektromagnet lemah dan berfungsi untuk menarik bijih besi yang memiliki sifat magnet kuat. Pasangan kedua termagnetisasi dengan kuat dan menarik wolframite, yang bersifat magnetis lemah. Mesin ini mampu mengolah 10 ton bijih per hari.

#### Aplikasi Lainnya

Pemisahan magnetik juga dapat digunakan dalam derek elektromagnetik yang memisahkan material magnetik dari zat sisa dan zat yang tidak diinginkan. Hal ini menyebabkan ia digunakan untuk peralatan pengiriman dan pengelolaan limbah. Logam yang tidak diinginkan dapat dihilangkan dari barang dengan teknik ini. Hal ini membuat semua material tetap murni. Pusat daur ulang sering menggunakan pemisahan magnetik untuk memisahkan komponen dari daur ulang, mengisolasi logam, dan memurnikan bijih. *Overhead magnets*, katrol magnet, dan drum magnet adalah

---

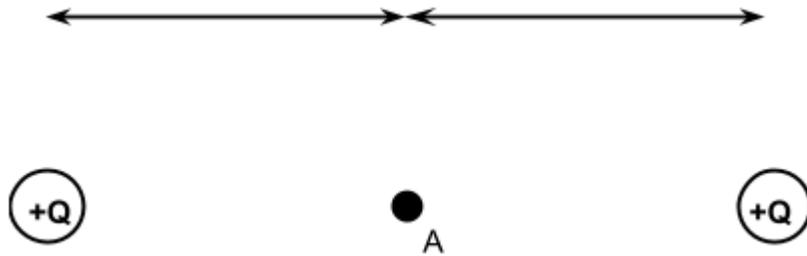
metode yang umum digunakan dalam industri daur ulang. Pemisahan magnetik juga berguna dalam menambang besi karena besi tertarik pada magnet.

Aplikasi lain, yang tidak diketahui secara luas tetapi sangat penting, adalah menggunakan magnet dalam industri proses untuk menghilangkan kontaminan logam dari aliran produk. Ini sangat penting dalam industri makanan atau farmasi.

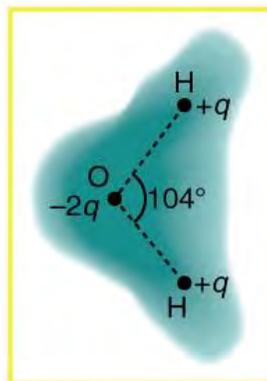
Pemisahan magnetik juga digunakan dalam industri berikut: susu, biji-bijian dan penggilingan, plastik, makanan, kimia, minyak, tekstil, dan banyak lagi. Teknik pemisahan magnetik juga digunakan dalam mikrobiologi. Dalam hal ini, molekul pengikat dan antibodi digunakan untuk mengisolasi organisme hidup tertentu, asam nukleat, atau antigen. Teknologi ini membantu mengisolasi spesies bakteri untuk mengidentifikasi dan memberikan diagnosis gen yang menargetkan organisme tertentu. Ketika teknik pemisahan magnetik digabungkan dengan PCR (polymerase chain reaction), hasilnya meningkatkan sensitivitas dan spesifisitas.

### **Soal**

1. Pada diagram di bawah ini, mana sajakah pernyataan yang benar tentang muatan titik di posisi A, yang berada di tengah-tengah antara dua muatan sumber positif yang besarnya sama?

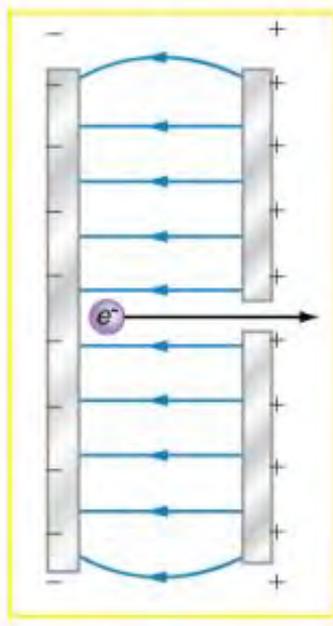


- a. Medan listriknya positif
  - b. Gaya elektrostatik totalnya adalah 0
  - c. Usaha dilakukan pada muatan titik
2. Mengapa muatan uji  $q$  dalam definisi medan listrik harus sekecil mungkin?
  3. Apakah arah dan besarnya gaya Coulomb unik pada suatu titik tertentu dalam ruang? Bagaimana dengan medan listrik?
  4. Gambar di bawah menunjukkan distribusi muatan dalam molekul air, yang disebut molekul polar karena memiliki pemisahan muatan yang melekat.



- a. Mengingat karakter polar air, jelaskan apa efek kelembaban dalam menghilangkan muatan berlebih dari benda.

- b. Dengan menggunakan Gambar, jelaskan, dalam kaitannya dengan hukum Coulomb, mengapa molekul polar (seperti pada Gambar) ditarik oleh muatan positif dan negatif.
- c. Mengingat karakter polar molekul air, jelaskan bagaimana ion di udara membentuk pusat nukleasi untuk tetesan hujan
5. Sebuah teknik sederhana dan umum untuk mempercepat elektron ditunjukkan pada Gambar, di mana ada medan listrik yang seragam antara dua pelat. Elektron dilepaskan, biasanya dari filamen panas, di dekat pelat negatif, dan ada lubang kecil di pelat positif yang memungkinkan elektron terus bergerak.



- a. Hitung percepatan elektron jika kuat medannya  $2,50 \times 10^4 \text{ N/C}$ .
- b. Jelaskan mengapa elektron tidak akan tertarik kembali ke pelat positif setelah bergerak melalui lubang.?



# BAB 3

## GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK INFRAMERAH (FTIR) DAN SINAR-X (XRF)

### **Kompetensi Dasar**

Menelaah dan menerapkan pengetahuan mahasiswa dengan cakupan pengetahuan faktual, konseptual, prosedural, dan metakognitif pada materi gelombang elektromagnetik.

### **Tujuan Pembelajaran**

Melalui pembahasan dalam bab ini, mahasiswa dapat:

1. Menjelaskan mengenai gelombang elektromagnetik dan penerapannya dengan kehidupan sehari-hari
2. Menguraikan hubungan antara gelombang elektromagnetik dan spektrum gelombang elektromagnetik
3. Merekonstruksi fenomena difraksi dan interferensi pada gelombang cahaya
4. Mengetahui prinsip dasar yang dipakai dalam teknologi FTIR
5. Mengetahui prinsip dasar yang dipakai dalam teknologi XRF

### **Pendahuluan**

Penglihatan kita merupakan salah satu contoh spektroskopi, yaitu melalui interaksi cahaya tampak dengan reseptor cahaya di mata kita. Cahaya dipancarkan oleh matahari atau dari sumber cahaya lain yang kemudian dipantulkan (atau ditransmisikan) melalui

benda-benda di sekitar kita. Dalam proses ini, warna terlihat berbeda-beda karena sebagian cahaya diserap oleh objek. Seberapa banyak dan daerah spectral yang diserap bergantung pada atom dan molekul yang menyusun objek tersebut. Cahaya yang tidak terserap akan mencapai mata kita, yang membawa informasi tentang struktur molekul objek tersebut. Pada mata kita, warna-warna tersebut dianalisis oleh tiga jenis fotoreseptor yang berbeda yang menyerap cahaya berbeda di daerah spectral tertentu.

Hal tersebut tidak hanya berlaku untuk cahaya tampak, namun berlaku pula terhadap radiasi elektromagnetik lainnya. Ilmu yang mempelajari interaksi antara radiasi elektromagnetik dengan objek materi disebut dengan spektroskopi. Karena pada cahaya terdapat konsep dualism partikel-gelombang, spektroskopi juga mencakup studi yang terkait dengan interaksi antara materi dan partikel. Sehingga pada bab kali ini, kita akan membahas pengaplikasian infra-merah dan sinar-X dan kaitannya dengan konsep dasar fisika dan kimia.

Cahaya tampak tersusun atas sejumlah frekuensi elektromagnetik yang berbeda, yang tiap frekuensinya terlihat sebagai warna yang berbeda pula. Radiasi inframerah dan sinar-x juga mengandung sejumlah frekuensi tertentu, namun tidak terlihat oleh mata. Energi yang dihasilkan dari rentang frekuensi ini dapat menyebabkan vibrasi pada molekul yang sangat khas dan spesifik untuk setiap ikatan kimia atau gugus fungsi. Metoda seperti ini bermanfaat untuk melakukan identifikasi terhadap senyawa organik dan organometalik.

Hingga saat ini, kita mengenal dua jenis spektroskopi, yaitu spektroskopi molekul dan spektroskopi atom. Konsep spektroskopi molekul yaitu level energi molekul radiasi yang terabsorpsi,

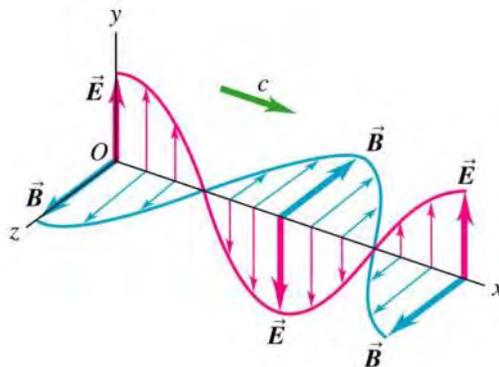
sedangkan spektroskopi atom yaitu level energi terluar suatu atom atau unsur yang terkait energi elektronik, vibrasi, dan rotasi.

### **Gelombang Elektromagnetik**

Gelombang adalah getaran (osilasi) yang merambat. Misalnya, gelombang air adalah getaran yang merambat melalui permukaan air, gelombang tali adalah perambatan getaran pada tali, dan gelombang bunyi di udara adalah perambatan getaran melalui molekul gas di udara.

Berdasarkan sifat dan bentuknya, gelombang terbagi dalam dua jenis, yaitu gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik. Gelombang mekanik merupakan gelombang yang rambatannya membutuhkan medium atau perantara. Gelombang mekanik bisa dalam bentuk gelombang transversal (rambatan tali atau dawai), ataupun bisa dalam bentuk gelombang longitudinal (melalui medium udara atau lainnya).

Selain contoh gelombang yang telah disebutkan tadi, kali ini kita akan mempelajari jenis gelombang yang sangat luar biasa pemanfaatannya bagi kehidupan kita.



Gambar 3.1 Skema perambatan gelombang elektromagnetik

Salah satu jenis gelombang tersebut adalah gelombang elektromagnetik (EM). Gelombang EM adalah perambatan osilasi medan listrik dan medan magnet yang ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 3.1, dimana  $E$  adalah symbol untuk medan listrik dan  $B$  adalah medan magnetik.

Gelombang EM dapat merambat melalui ruang hampa ataupun melalui medium tertentu. Sebagai contoh, cahaya matahari dan bintang-bintang yang sampai ke permukaan bumi menunjukkan kemampuan gelombang EM untuk dapat merambat melalui ruang hampa. Air dan gelas yang dapat ditembus oleh cahaya juga merupakan contoh lain dari kemampuan gelombang EM untuk merambat melalui bahan tertentu.

Pemanfaatan gelombang EM di sekitar kita juga sangat banyak sekali saat ini. Terkhusus pada pembahasan kali ini, kita juga akan membahas penerapan inframerah dan sinar-x sebagai bagian dari gelombang EM pada teknologi FTIR dan XRF yang dimanfaatkan untuk melakukan analisis terhadap unsur-unsur yang terdapat pada suatu unsur atau materi.

### **Spektrum Gelombang Elektromagnetik**

Kita akan memanfaatkan fenomena pelangi yang sering kita lihat untuk menjelaskan persoalan spektrum kali ini dengan lebih nyata. Pada dasarnya, kita telah mengetahui bahwa pelangi terjadi ketika cahaya matahari dibiaskan saat melewati tetesan air di atmosfer bumi. Cahaya yang berwarna putih merupakan campuran dari 6 hingga 7 warna yang masing-masing terbiaskan dengan sudut yang berbeda. Sehingga, dihasilkan susunan warna-warna yang sering kita lihat selama ini mulai dari merah hingga violet.



Gambar 3.2 Fenomena pembentukan spektrum cahaya oleh prisma. Fenomena seperti ini akan kita lihat pula melalui percobaan di laboratorium ketika melewatkan cahaya melalui sebuah prisma seperti pada Gambar 3.2. Susunan warna-warna inilah yang kita sebut sebagai spektrum.

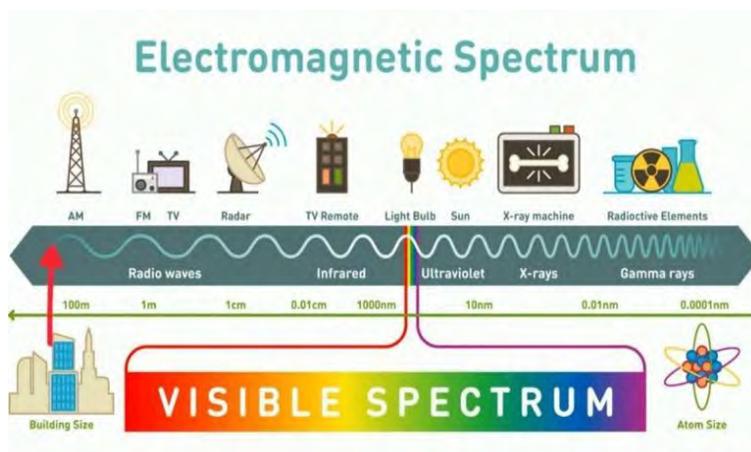
Spektrum cahaya tidak hanya terdiri atas warna-warna yang terlihat oleh mata manusia. Ada warna lainnya yang tidak terlihat, namun masih dapat terdeteksi melalui perangkat khusus. Setelah warna violet pada spektrum, masih terdapat ultraviolet, sinar-X (X-ray), dan sinar gamma. Bahkan setelah warna merah, masih terdapat inframerah dan radio. Walaupun kita tidak dapat melihatnya, spektrum lain yang disebutkan tadi sangat dekat dengan kehidupan kita sehari-hari. Sebagai contoh, kita menggunakan radio untuk menyetel musik melalui mobil kita, ultraviolet (UV) yang dapat membuat kulit kita berwarna kecoklatan, X-ray yang digunakan di bidang radiologi untuk melihat kondisi tulang di dalam tubuh, atau kita menukar siaran televisi kita dengan mengirimkan sinyal inframerah melalui remot TV.

Para ilmuwan mengelompokkan cahaya sebagai radiasi elektromagnetik atau gelombang elektromagnetik (EM). Disebut

radiasi, karena merupakan energi yang ditransfer (dari suatu tempat ke tempat lainnya) tanpa membutuhkan kontak secara langsung. Setiap warna pada cahaya yang kita bahas tadi, masing-masing membawa sejumlah energi yang berbeda. Dimana sinar gamma adalah yang paling kuat (membawa lebih banyak energi), sedangkan radio membawa energi yang lebih sedikit.

Energi ini ditransfer dalam bentuk gelombang, dan tiap warna memiliki ukuran panjang gelombang yang berbeda. Makin banyak energi yang dibawa oleh suatu gelombang, maka makin pendek pula ukuran gelombangnya. Oleh karena itu, X-ray memiliki panjang gelombang yang lebih pendek dibandingkan gelombang cahaya tampak, dan cahaya tampak memiliki gelombang yang lebih pendek dibandingkan gelombang radio.

Sebaran frekuensi gelombang EM sangat luas, mulai dari  $10^2\text{Hz}$  sampai di atas  $10^{23}\text{Hz}$ . Jangkauan frekuensi tersebut, dikelompokkan ke dalam beberapa sepektrum yang memiliki aspek aplikasi yang berbeda-beda. Pembagian kelompok gelombang EM yang disepakati saat ini ditunjukkan oleh Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Berbagai jenis spektrum gelombang elektromagnetik

Berdasarkan pengelompokan gelombang EM pada gambar, pada pembahasan kali ini kita akan fokus terhadap dua jenis gelombang saja, yaitu: Sinar Inframerah (IR) dan Sinar-X.

### **Inframerah**

Inframerah merupakan salah satu jenis gelombang elektromagnetik yang berada di sekitar cahaya tampak dan gelombang radio pada spektrum gelombang elektromagnetik, yang memiliki panjang gelombang  $0,74 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$ .

Ditemukan oleh William Herschel pada tahun 1800, dan disebutkan bahwa semua benda bersuhu lebih tinggi (hangat) dapat memancarkan gelombang inframerah (IR). Gelombang inframerah mampu melewati debu dan asap dengan lebih mudah dibandingkan cahaya tampak, sehingga detektor inframerah digunakan oleh tim penyelamat untuk mendeksi orang atau oleh tentara dalam penyerangan dalam tempat berasap. Contoh perangkat detector inframerah ditunjukkan melalui Gambar 3.4, dimana citra ditampilkan berdasarkan perbedaan suhu permukaan benda. IR juga hanya sedikit dihambat oleh debu antar bintang dibandingkan dengan cahaya tampak dan infrared astronomy satellite (IRAS) memanfaatkan hal ini untuk menganalisa kondisi langit.



Gambar 3.4. Contoh aplikasi inframerah pada teknologi

### **Sinar-X**

Pada spektrum elektromagnetik, sinar-x berada diantara sinar ultraviolet dan sinar gamma dengan panjang gelombangnya di sekitar 0,01 nm hingga 10 nm. Saat ini, terdapat beberapa metode umum untuk menghasilkan x-ray, salah satunya yaitu dengan mengarahkan suatu elektron dengan kecepatan tinggi ke sebuah logam target. Sesuai dengan penjelasan formulasi maxwell, elektron tersebut akan memancarkan radiasi elektromagnetik saat melambat, yang disebut Bremsstrahlung. Penjelasan lainnya adalah, pada proses tersebut elektron memiliki cukup energi untuk melepaskan elektron dari kulit lebih rendah, sehingga akan memancarkan foton dengan suatu energi tertentu.

Sinar-X dihasilkan ketika electron diperlambat dalam waktu yang sangat singkat, misalnya saat electron yang berkecepatan sangat tinggi dihentikan akibat tumbukan dengan permukaan logam. Ditemukan pertama kali oleh William Rontgern, sinar-x muncul saat beliau melakukan percobaan dengan sinar katoda. Pada percobaan tersebut, layer fosfor yang berjarak beberapa meter dari

sinar katoda terlihat berpendar. Teramati juga bahwa sinar-X mampu melewati bagian tubuh yang lunak dengan mudah, namun diserap oleh material yang lebih rapat seperti logam dan tulang. Sehingga, sinar-X digunakan dalam bidang kedokteran untuk mengamati keadaan pada tulang.

Pada Gambar 3.5., terlihat contoh gambar tulang lengan yang patah yang diambil menggunakan teknologi sinar-X. Sinar-X ditembakkan ke arah lengan, dan di belakangnya diletakkan film yang sensitif terhadap sinar-X. Sinar-X dapat menembus daging dengan mudah, sehingga menghasilkan pengaruh pada film. Sementara itu, tulang menahan sinar yang ditembakkan sehingga tidak mencapai film di belakangnya. Perbedaan sifat film yang merespon sinar-X inilah yang menghasilkan citra seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Aplikasi sinar-X dalam bidang kesehatan

### **Interferensi**

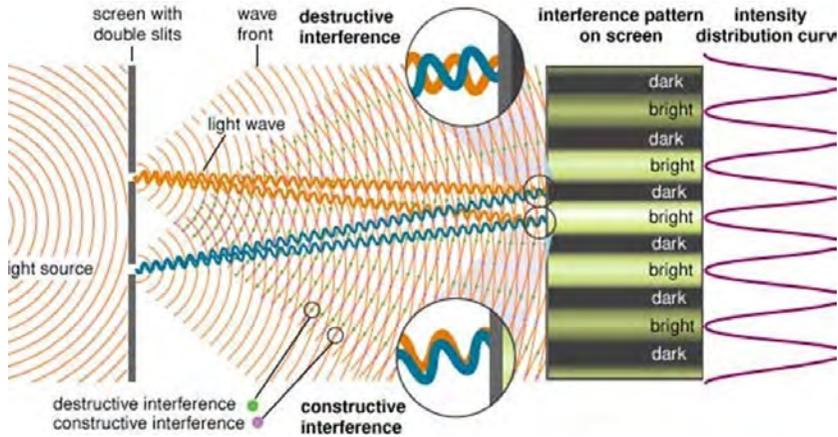
Interferensi merupakan perpaduan antara dua gelombang atau lebih menjadi satu gelombang yang baru. Jika kedua gelombang

---

tersebut merupakan gelombang sefase, maka akan terjadi interferensi yang konstruktif (saling menguatkan) dimana gelombang resultan memiliki amplitude yang maksimum. Namun, jika kedua gelombang memiliki fase yang berlawanan, maka akan terjadi interferensi yang destruktif (saling melemahkan), dimana gelombang resultan memiliki amplitude nol. Secara sederhana, kita dapat menggunakan sebuah baskom yang berisi air untuk melihat fenomena interferensi gelombang di permukaan air yang menghasilkan variasi pola-pola gelombang air secara sederhana.

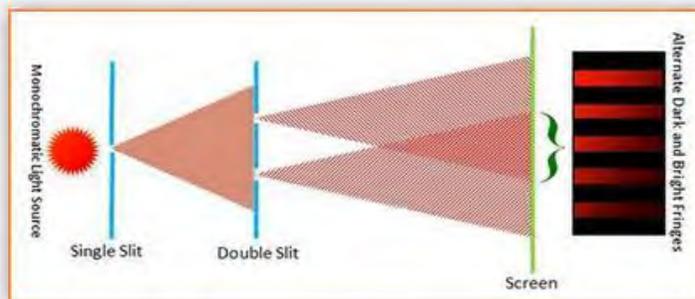
Warna-warni yang kita lihat pada pelangi juga menunjukkan bahwa sinar matahari adalah kesatuan dari berbagai warna dari spektrum cahaya tampak. Di sisi lain, warna yang kita lihat pada gelembung sabun, lapisan minyak, warna bulu burung merak dan kolibri, bukanlah sebuah fenomena pembiasan. Hal ini dikarenakan interferensi konstruktif dan destruktif dari sinar yang dipantulkan oleh suatu lapisan tipis. Gejala ini, menjadi bukti bahwa cahaya adalah gelombang. Interferensi cahaya dapat terjadi jika ada dua atau lebih berkas sinar yang bergabung. Jika bentuk cahaya tersebut bukan sebuah berkas sinar, maka akan sulit bagi kita untuk mengamati interferensi karena cahaya memiliki panjang gelombang yang sangat pendek (hanya 400 – 700 nm).

Pengamatan terhadap interferensi cahaya tidak senyata saat kita mengamati interferensi pada gelombang air ataupun bunyi. Interferensi akan terjadi jika sudah memenuhi dua syarat, kedua gelombang harus koheren (memiliki beda fase yang selalu tetap; frekuensi harus sama), dan kedua gelombang harus memiliki amplitude yang hampir sama. Ilustrasi terjadinya interferensi cahaya dapat dilihat melalui Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Interferensi Cahaya

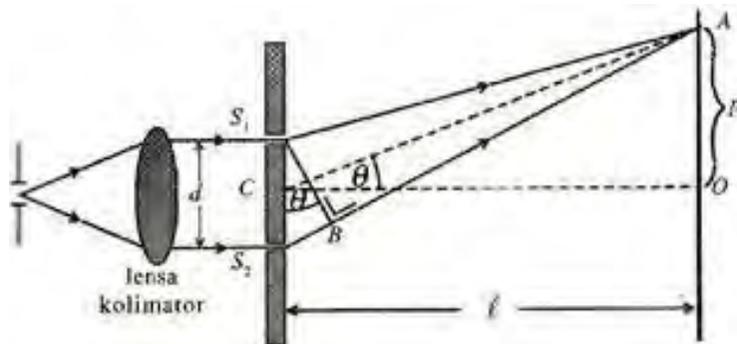
Untuk melakukan eksperimen untuk melihat fenomena interferensi cahaya, Young menggunakan suatu sumber cahaya yang ditembakkan ke dua buah penghalang, penghalang pertama memiliki satu lubang kecil dan yang kedua memiliki dua lubang kecil (ditunjukkan pada Gambar 3.7).



Gambar 3.7 Percobaan interferensi Young

Dengan metode tersebut, diperoleh dua sumber cahaya koheren yang berasal dari sebuah sumber cahaya yang monokromatis. Hasilnya, pada layar akan tampak pola garis gelap dan terang yang membuktikan bahwa cahaya bisa berinterferensi. Interferensi akan terjadi karena terdapat perbedaan fase cahaya dari kedua celah tersebut.

Hasil pola interferensi yang dihasilkan (pada Gambar 3.8) adalah pola garis terang dan gelap pada layar yang silih berganti. Pola garis yang terang terjadi jika sumber cahaya mengalami interferensi konstruktif, dan pola garis yang gelap terjadi jika sumber cahaya mengalami interferensi destruktif. Jika kedua sumber memiliki amplitude yang sama, maka pada lokasi terjadinya interferensi destruktif akan terbentuk titik yang gelap sama sekali. Sebagai penjelasan yang lebih rinci, mari perhatikan penurunan formulasi interferensi dua celah berikut.



Gambar 3.8 Skema pola interferensi pada percobaan

Pada Gambar 3.8, kita dapat melihat bahwa lensa kolimator menghasilkan seberkas cahaya sejajar yang kemudian melewati celah ganda sehingga  $S_1$  dan  $S_2$  merupakan dua sumber cahaya monokromatis. Setelah itu, terlihat bahwa kedua cahaya menuju sebuah titik A pada layar. Selisih jarak yang ditempuh ( $S_2A - S_1A$ ) disebut beda lintasan yang diformulasikan dengan:

$$\Delta S = S_2A - S_1A \quad (3.1)$$

Jika jarak  $S_1A$  dan  $S_2A$  sangat besar dibanding jarak  $S_1$  ke  $S_2$ , dan ( $S_1S_2 = d$ ), sinar  $S_1A$  dan  $S_2A$  dapat dianggap sejajar dan selisih jaraknya adalah ( $\Delta S = S_2B$ ). Berdasarkan segitigas  $S_1S_2B$ , diperoleh:

$$S_2B = S_1S_2 \sin \theta = d \sin \theta \quad (3.2)$$

Dimana:

$d$  = jarak antara kedua celah.

Kemudian, perhatikan segitiga  $COA$ :

$$\sin \theta = \frac{P}{CA} \quad (3.3)$$

Untuk sudut kecil, didapatkan:

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \frac{p}{l} \quad (3.4)$$

Untuk  $\theta$  kecil, berarti  $p/l$  kecil atau  $p \ll l$  sehingga selisih kecepatan yang ditempuh oleh cahaya dari sumber  $S_2$  dan  $S_1$  akan memenuhi persamaan:

$$\Delta S = S_2B = d \sin \theta \approx d \tan \theta = \frac{dp}{l} \quad (3.5)$$

Interferensi maksimum akan terjadi jika kedua gelombang yang tiba di titik A memiliki fase yang sama. Kedua gelombang dikatakan sefase jika beda lintasannya merupakan kelipatan bilangan cacah dari panjang gelombang

$$\Delta S = m\lambda \quad (3.6)$$

Jadi, persamaan interferensi maksimum akan menjadi:

$$\frac{dp}{l} = m\lambda \quad (3.7)$$

Dengan:

$d$  = jarak antara celah pada layar;

$p$  = jarak titik pusat interferensi ( $0$ ) ke garis terang di  $A$ ;

$l$  = jarak celah ke layar;

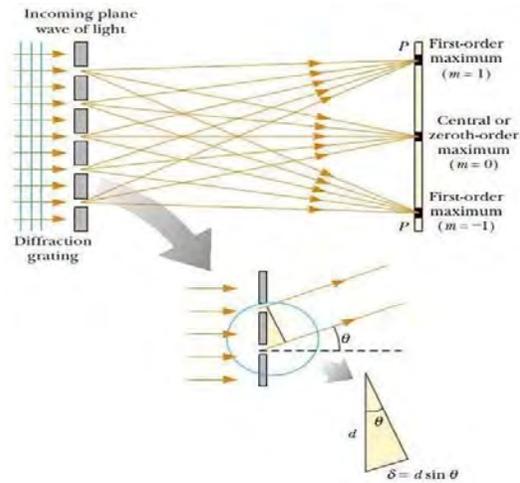
$\lambda$  = panjang gelombang cahaya;

$m$  = orde interferensi ( $0, 1, 2, 3, \dots$ )

### **Difraksi**

Difraksi merupakan penyebaran atau pembelokan gelombang yang terjadi pada saat melintasi celah atau sebuah penghalang. Gelombang tersebut selanjutnya akan berinterferensi (dengan gelombang lainnya satu sama lain) hingga menghasilkan daerah penguatan dan pelemahan. Difraksi juga bisa terjadi pada partikel yang mengalir. Dengan kata lain, difraksi merupakan fenomena dimana seberkas cahaya akan dilentukan pada saat melalui sebuah celah yang sempit.

Kisi difraksi merupakan sebuah keping kaca yang digores sejajar dan berjumlah sangat banyak, serta memiliki jarak yang sama (biasanya dalam ordo 1000 per mm). Cahaya mengalami difraksi setelah diteruskan melalui kaca (atau dipantulkan) menghasilkan cahaya maksimum pada  $\theta = 0^\circ$  dan berkurang hingga minimum (*intensitas* = 0) pada sudut  $\theta$ . Untuk lewat pada pola difraksi cahaya, cahaya dimodifikasi sedemikian rupa agar melewati sebuah celah tunggal dan mengamati cahaya yang diteruskan oleh celah sempit pada film.



Gambar 3.9 Skema percobaan difraksi cahaya

Difraksi pada celah tunggal akan menghasilkan pola garis terang dan gelap pada layar. Celah tunggal terdiri atas sejumlah celah sempit dan setiap celah merupakan sumber cahaya sehingga satu dan celah lain saling dapat berinterferensi (perhatikan Gambar 3.9). Difraksi cahaya dapat terjadi pula pada cahaya yang melalui banyak celah sempit dengan jarak celah yang sama. Celah-celah sempit tersebut, dengan kata lain, dapat disebut dengan kisi difraksi. Lebar tiap celah pada kisi difraksi disebut dengan konstanta kisi dan disimbolkan dengan  $d$ . Jika pada sebuah kisi sepanjang  $1\text{ cm}$  terdapat  $N$  celah, maka konstanta kisinya adalah:

$$d = \frac{1}{N} \text{ cm} \quad (3.8)$$

Pada titik P akan terjadi pola terang jika memenuhi persamaan:

$$d \sin \theta = n \lambda \text{ atau } \frac{dp}{l} = n \lambda \quad (3.9)$$

Dimana:

$p$  = jarak pola interferensi pada layar

$l$  = jarak layar kisi

$n$  = konstanta ( $n = 1, 2, 3, \dots$  dst),

$\lambda$  = panjang gelombang.

## **STEM**

### ***Fourier Transform Infrared (FTIR)***

Prinsip Kerja

Konsep dasar dari Spektrofotometer Fourier Transform Infrared adalah berasal dari persamaan gelombang yang diformulasikan oleh Jean Baptiste Joseph Fourier, yang persamaanya adalah sebagai berikut:

$$I(\delta) = \int_0^{+\infty} B(\vec{\nu}) \cos \cos (2\pi\vec{\nu}\delta) d\vec{\nu} \quad (3.10)$$

$$B(\delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\vec{\nu}) \cos \cos (2\pi\vec{\nu}\delta) d\delta$$

Melalui formulasi deret Fourier tersebut, intensitas gelombang digambarkan sebagai daerah waktu atau daerah frekuensi. Perubahan intensitas gelombang radiasi EM dari daerah waktu ke daerah frekuensi (atau sebaliknya) disebut Transformasi Fourier (Fourier Transform). Pada sistem optik FTIR digunakan radiasi LASER (Light Amplification by Stimulated Emmission of Radiation) yang berfungsi sebagai radiasi yang di interferensikan dengan radiasi infra merah agar sinyal radiasi inframerah dapat diterima oleh detektor secara utuh dan lebih baik.

Prinsip kerja FTIR adalah adanya interaksi energi dengan materi. Misalnya di dalam suatu percobaan terdapat molekul senyawa kompleks yang ditembakkan dengan seberkas energi dari sumber sinar yang akan menyebabkan molekul tersebut mengalami vibrasi. Sumber sinar yang digunakan adalah keramik yang dialiri arus listrik sehingga dapat memancarkan infrared. Vibrasi disebabkan oleh energi yang berasal dari sinar infrared, namun tidak cukup kuat untuk menyebabkan eksitasi elektron pada molekul senyawa target. Besarnya energi vibrasi tiap atom atau molekul berbeda-beda tergantung pada atom-atom dan kuatnya ikatan yang menghubungkan, sehingga frekuensi yang dihasilkan juga berbeda. Spektroskopi inframerah bekerja pada radiasi elektromagnetik pada rentang frekuensi  $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  dimana  $\text{cm}^{-1}$  disebut sebagai wavenumber ( $1/\text{wavelength}$ ) yang merupakan ukuran unit frekuensi.

FTIR dimanfaatkan untuk melakukan analisa terhadap ikatan kimia yang dapat ditentukan dari spektra vibrasi yang dihasilkan oleh suatu senyawa pada panjang gelombang tertentu. Karakterisasi FTIR dilakukan dengan menganalisis spektra yang dihasilkan sesuai dengan puncak-puncak yang dibentuk oleh suatu gugus fungsi, karena senyawa tersebut mampu mengabsorpsi radiasi elektromagnetik pada daerah inframerah dengan panjang gelombang antara  $0,78 - 1000 \mu\text{m}$ .

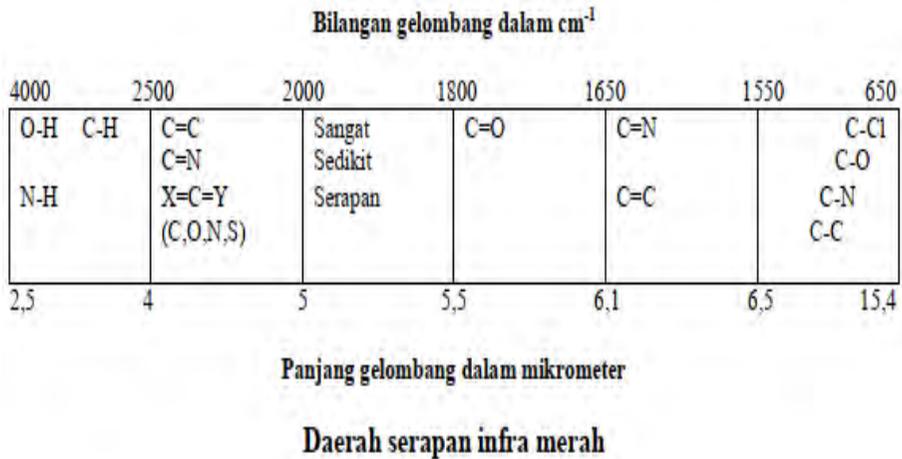
Apabila radiasi inframerah ditembakkan ke sebuah material target, maka molekulnya dapat mengabsorpsi (menyerap) energi dan terjadi transisi di antara tingkat vibrasi (ground state) dan tingkat vibrasi tereksitasi (excited state). Sebagai contoh, suatu ikatan C-H yang bervibrasi 90 triliun kali dalam satu detik mesti menyerap radiasi inframerah pada frekuensi tersebut ( $9,0 \times 10^{13} \text{ Hz}$ ,  $3000 \text{ cm}^{-1}$ )

untuk pindah ke tingkat vibrasi eksitasi pertama. Absorpsi energi pada frekuensi tertentu, dapat dideteksi oleh spektrofotometer infrared, yang melakukan plot terhadap jumlah radiasi inframerah yang diteruskan sebagai fungsi frekuensi (atau panjang gelombang) radiasi. Plot yang dihasilkan memberikan informasi mengenai gugus fungsional suatu molekul.

### Spektra IR

Hampir setiap senyawa (organic maupun anorganik) yang memiliki ikatan kovalen akan menyerap frekuensi radiasi elektromagnetik dengan panjang gelombang 0,5 hingga 1000  $\mu\text{m}$ . Dalam kimia organic, fungsi utama spektrometri IR ialah mengenali struktur molekul, terkhusus gugus fungsional seperti OH, C=O, dan C=C. Daerah yang paling berguna untuk mengenali struktur suatu senyawa ialah pada daerah 1-25  $\mu\text{m}$  atau 10.000 – 400  $\text{cm}^{-1}$ . Di dalam praktiknya, satuan yang umum dipakai yaitu satuan frekuensi ( $\text{cm}^{-1}$ ), bukan satuan panjang gelombang. Serapan tiap jenis ikatan (N-H, C-H, OH, C-X, C=O, C-O, C-C, C=C, C=N, dll) hanya didapatkan dalam bagian kecil tertentu dari daerah vibrasi inframerah. Kisaran serapan yang kecil dapat digunakan untuk menentukan tipe ikatan.

Untuk memperoleh informasi mengenai struktur senyawa organic, kita harus mengenali frekuensi atau panjang gelombang yang diserap oleh berbagai gugus fungsional. Misalnya, setiap serapan di kisaran 3000 + 150 $\text{cm}$  hampir selalu diakibatkan oleh adanya ikatan C=O (gugus karbonil). Pada Gambar 3.10, tersusun secara sistematis daerah serapan yang sesuai dengan ikatan yang terdapat dalam senyawa.



Gambar 3.10 Daerah serapan inframerah

Sebagai informasi tambahan mengenai absorpsi inframerah, disajikan data mengenai absorpsi infra merah pada tabel X.

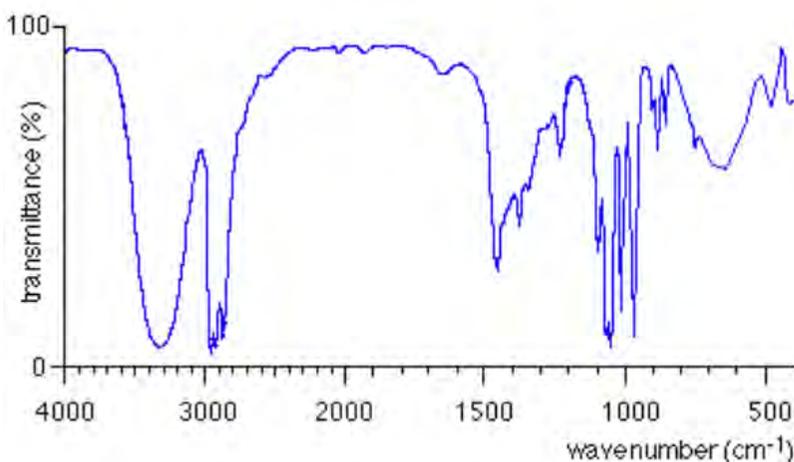
Tabel 3.1 Absorpsi Inframerah

Gugus	Senyawa	Frekuensi ( $\text{cm}^{-1}$ )	Lingkungan spectral $\text{cm}^{-1}$ ( $\mu$ )	Nama lingkungan
OH	Alkohol	3580-3650	3333-3704 (2, 7-3, 0)	
	Asam	2500-2700		
NH	Amina Primer dan sekunder	3310-3500	2857-3333 (3, 0-3, 5)	Lingkungan vibrasi ulur hidrogen
	Amida	3140-3320		
CH	Alkana	3300	2500-2857 (4, 0-4, 5)	
	Alkena	3010-3095		
	Aromatik	-3030		
	Alkana	2853-2962		
	Aldehida	2700-2900		
SH	Sulfur	2500-2700		
C=C	Alkana	2190-2260		
C=N	Alkilnitril	2240-2260	2222-2500 (4, 5-5, 0)	Lingkungan ikatan ganda tiga
	Iosianat	2240-2275		
	Arilnitril	2220-2240		
- N=C=N	Diimida	2130-2155	2000-2222 (5, 0-5, 5)	
- N <sub>3</sub>	Azida	2120-2160		

Gugus	Senyawa	Frekuensi (cm <sup>-1</sup> )	Lingkungan spectral cm <sup>-1</sup> ( $\mu$ )	Nama lingkungan
>CO	Aldehyd	1720-1740	818-2000 (5, 5-6, 0)	
	Keton	1675-1725		
	Asam Karboksilat	1700-1725		
	Ester	2000-2300		
	Asilhalida	1755-1850	1667-1818 (6, 0-6, 5)	Lingkungan ikatan ganda dua
	Amida	1670-1700		
CN	Oksim	1640-1690		
CO	$\beta$ -diketon	1540-1640		
C=O	Ester	1650		
C=C	Alkena	1620-1680		
N-H(b)	Amina	1575-1650	1538-1667	
-N=N-	Azo	1575-1630	(6, 5-7, 5)	Daerah sidik jari
-C-NO <sub>2</sub>	Nitro	1550-1570	1538-1667	
-C-NO <sub>2</sub>	Nitro Aromatik	1300-1570		
C-O-C	Eter	1230-1270	1053-1333 (7, 5-9, 5)	
-(CH <sub>2</sub> )n	Senyawaan lain	-722	666-900 (11-15,0)	

### Aplikasi

Spektrum inframerah yaitu plot antara transmitans dengan frekuensi atau bilangan gelombang. Spektrum ini menunjukkan banyaknya puncak absorpsi (pita) pada frekuensi atau bilangan gelombang karakteristik. Daerah bilangan gelombang yang sering dipakai ialah berkisar antara 4000-670 cm<sup>-1</sup> (2,5-15  $\mu$ m). Coba perhatikan spektrum inframerah 1-propanol pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Contoh spektrum inframerah pada 1-propanol. Daerah di antara  $4000 - 1400 \text{ cm}^{-1}$  ( $2,5 - 7,1 \mu\text{m}$ ), bagian kiri spektrum inframerah, merupakan daerah yang digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsional. Daerah ini memperlihatkan penyerapan yang disebabkan oleh vibrasi uluran yang khas bagi gugus-gugus fungsi penting seperti OH, NH dan C=O. Tidak adanya serapan pada gugus tertentu diartikan bahwa molekul atau senyawa tersebut tidak memiliki gugus tersebut. Ketiadaan serapan pada daerah  $1850-1540 \text{ cm}^{-1}$  menggambarkan tidak adanya struktur yang mengandung gugus karbonil. Namun, melakukan analisa seperti ini harus berhati-hati, karena suatu struktur tertentu yang khas dapat membuat sebuah pita menjadi terlalu lebar hingga salah/tidak terartikan. Contohnya saja seperti ikatan antar hydrogen pada asetilaseton yang pada bentuk enolnya menghasilkan pita O-H yang lebar, sehingga terjadi kesalahan interpretasi.

Daerah di bagian kanan  $1400 \text{ cm}^{-1}$  agak rumit karena vibrasi uluran maupun tekuk menyebabkan absorpsi di daerah itu. Pada daerah ini, biasanya korelasi antara suatu pita dan gugus fungsional tidak bisa ditarik dengan cermat; namun, setiap

senyawa organik masing-masing memiliki absorpsi yang unik. Sehingga, bagian spektrum ini disebut daerah sidikjari (fingerprint region). Meskipun demikian, bagian sebelah kiri spektrum tampak sama untuk senyawa yang mirip, daerah sidik jari mesti cocok pula antara dua spektra agar dapat ditarik kesimpulan bahwa kedua senyawa itu sama.

Untuk melakukan interpretasi terhadap sebuah spektrum inframerah, tidak ada aturan yang pasti. Namun, terdapat beberapa syarat yang mesti terpenuhi sebelum melakukan interpretasi dan analisa pada sebuah spektrum, yaitu:

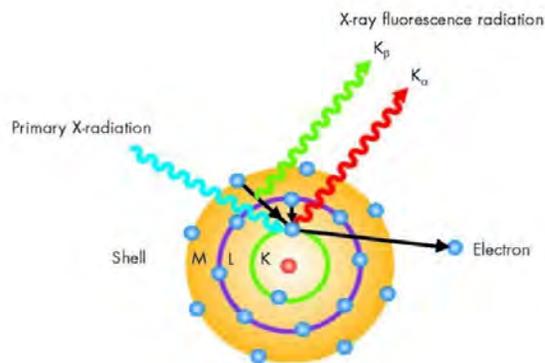
1. Spektrum harus cukup terpisah dan memiliki puncak yang cukup memadai
2. Spektrum adalah hasil analisis senyawa murni
3. Spektrofotometer harus dikalibrasi yang membuat pita serapan akan teramati pada bilangan gelombang yang tepat.
4. Metode penanganan sampel juga harus diperhatikan dengan baik.

### **X-Ray Fluorescence (XRF) Spectrometry**

XRF adalah sebuah teknik untuk menganalisis unsur pembentuk dari suatu material dengan memanfaatkan interaksi antara sinar X dengan material target. Teknik ini sering digunakan untuk menganalisa batuan karena membutuhkan jumlah sampel yang relatif sedikit (kurang lebih sekitar 1 gram). Teknik seperti ini dapat digunakan untuk mengukur unsur-unsur yang terdapat dalam batuan atau mineral. Sampel yang digunakan biasanya berbentuk serbuk hasil penggilingan menjadi sebuah film.

## Prinsip Kerja

Apabila suatu elektron dari kulit atom bagian dalam dilepaskan, maka elektron pada bagian kulit yang lebih luar akan berpindah pada kulit yang ditinggalkan dan menghasilkan sinar-X dengan panjang gelombang karakteristik unsur tersebut. Coba perhatikan ilustrasi pada Gambar 3.12. Pada teknik ini, digunakan sinar-X yang berasal dari tabung sumber untuk mengeluarkan elektron dari kulit dari bagian lebih dalam untuk menghasilkan sinar-X dari sampel yang dianalisis.



Gambar 3.12 Skema mekanisme prinsip alat XRF

Elektron dari kulit bagian lebih dalam pada suatu atom akan menghasilkan sinar-X dengan karakteristik panjang gelombang yang berbeda untuk setiap atom pada sampel. Pada setiap atom di dalam sampel, intensitas sinar-X karakteristik tersebut sebanding dengan jumlah (konsentrasi) atom di dalam sampel. Oleh karena itu, jika kita bisa melakukan pengukuran terhadap intensitas sinar-X dari setiap unsur, kita dapat membandingkan intensitasnya dengan standar yang telah diketahui konsentrasinya, sehingga konsentrasi unsur di dalam sampel dapat kita tentukan.

Instrumen perangkat yang digunakan dinamakan X-Ray Fluorescence (XRF). Alat ini terdiri dari tabung sumber sinar-X

yang mampu mengeluarkan elektron dari unsur pada sampel yang akan diteliti. Sinar-X yang dihasilkan mestilah memiliki energi yang sangat tinggi, sehingga anoda target dalam tabung sumber harus berupa unsur Cr, Mo, W, atau Au.

Sinar-X ini kemudian dilewatkan melalui sebuah kolimator untuk menghasilkan berkas sinar yang koheren. Berkas ini kemudian didifraksikan yang nilai  $d$  nya telah diketahui. Dengan menggunakan persamaan Bragg ( $n\lambda = 2d \sin \theta$ ), kita dapat menentukan sudut  $\theta$  dari sinar-X yang panjang gelombangnya sudah diketahui. Kemudian kristal dan detector diatur sedemikian rupa agar mendifraksikan panjang gelombang tertentu.

Dalam melakukan identifikasi terhadap suatu unsur di dalam material, akan sangat mungkin jika setiap unsur yang berbeda di dalam material itu memancarkan radiasi sebagai hasil dari interaksinya dengan cahaya yang mengenai material tersebut, sehingga nantinya cahaya monokromatik yang dihasilkan akan bergabung memancarkan cahaya polikromatik. Agar identifikasi keberadaan suatu unsur dalam sampel dapat dilakukan, berkas cahaya polikromatik harus dipisahkan menjadi berkas cahaya monokromatik yang masing-masing memiliki karakteristik panjang gelombang yang berbeda. Pada prinsipnya, instrument XRF menggunakan dua buah teknik untuk memisahkan berkas cahaya polikromatik tersebut. Teknik pertama adalah pemisahan panjang gelombang (wavelength-dispersive) dan teknik pemisahan energi (energy-dispersive). Teknik yang pertama (pemisahan panjang gelombang), memanfaatkan kristal single untuk mendifraksi berkas cahaya sehingga akan menghasilkan pita panjang gelombang yang berbeda-beda. Sementara teknik yang kedua (pemisahan energi) dilakukan dengan menggunakan detector yang

---

mampu mengisolasi pita energi yang berbeda-beda. Setiap transisi elektron yang dihasilkan pada setiap pada tiap unsur atom, memiliki nilai panjang gelombang tertentu. Sehingga dengan mengetahui panjang gelombang cahaya yang dipancarkan, maka akan dapat teridentifikasi unsur yang terdapat pada sampel tersebut.

### Aplikasi

Salah satu aplikasi dari XRF adalah melakukan identifikasi apakah material hasil sintesis telah terbentuk sesuai dengan yang diharapkan. Hasil analisa ini memungkinkan untuk dilakukan karena tiap unsur mempunyai energi dengan karakteristik masing-masing ketika terjadi transisi elektron. Sebagai contoh, berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Setiabudi, dkk (2011) di dalam sintesa material NASICON, hasilnya diperoleh presentase kandung unsur dalam material masing masing pada tabel X.

Tabel 3.2 Contoh presentase kandungan unsur material

Zat Aditif	% Kadar Unsur				Perkiraan Rumus Senyawa
	Na	Zr	Si	P	
Tanpa Aditif	32.3181	31.1487	23.4843	13.0489	$Na_{2.7}Zr_{2.6}Si_{1.9}P_{1.1}$
Asam Tartarat	28.9689	38.9233	22.3369	9.7708	$Na_{2.7}Zr_{2.6}Si_{2.1}P_{0.9}$

Pada hasil itu, terlihat rumus kimia material yang dihasilkan mendekati rumus stoikiometri NASICON  $Na_{1+x}Zr_2Si_xP_{3-x}O_{12}$  yang memiliki struktur rhombohedral simetri. Adanya Zr berlebih juga terlihat pada struktur NASICON, sehingga ada indikasi terbentuknya  $ZrO_2$  pada material hasil sintesis.

Pada penerapannya, metode XRF memiliki sejumlah kelebihan, antara lain:

- Mampu menentukan unsur dalam material tanpa perlu standar

- Mampu menentukan kandungan mineral dalam bahan biologis maupun dalam tubuh secara langsung
- Akurasi relative tinggi

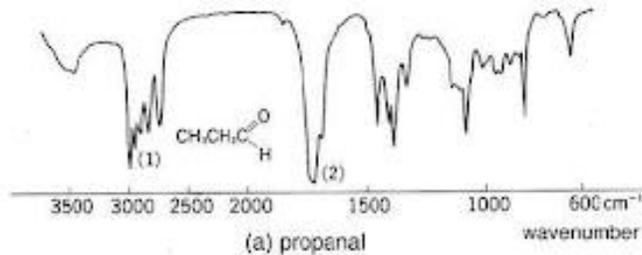
Di sisi lain, kelemahan metode ini ialah:

- Terbatas dalam melakukan analisa secara akurat terhadap unsur yang mempunyai  $Z < 9$
- Analisa XRF tidak bisa memedakan isotop sebuah unsur
- Analisis yang dilakukan tidak dapat membedakan ion pada unsur yang sama pada keadaan valensi berbeda.
- Tidak bisa mengetahui senyawa yang dibentuk oleh unsur-unsur yang terkandung dalam material yang akan diteliti.
- Tidak mampu menentukan struktur atom yang membentuk material.

### **Soal**

1. FTIR merupakan alat yang dimanfaatkan untuk mengetahui gugus fungsional yang terdapat dalam suatu material atau bahan. Pada alat tersebut, terdapat cermin yang bergerak yang berfungsi untuk mengubah panjang jalur optic sehingga dihasilkan interferensi cahaya antara dua berkas yang terbelah.
  - a. Dapatkah kamu mendeskripsikan mekanisme kerja pada mesin FTIR ketika digunakan untuk mengetahui gugus fungsi suatu bahan/material?
  - b. Misalnya saja, celah yang dihasilkan adalah sebesar 1 nm dengan panjang gelombang berkas sinar yang digunakan adalah sebesar 700 nm. Jika jarak sumber berkas cahaya ke layar adalah sekitar 10 cm, berapakah jarak antara garis gelap kedua pusat pola?

- c. Cobalah lakukan analisis terhadap hasil kurva FTIR berikut!



2. Saat melakukan karakterisasi dengan alat XRF, sinar X yang awalnya dipancarkan kemudian akan dilewatkan melalui sebuah kolimator dan akan dihasilkan berkas sinar yang koheren. Berkas sinar ini kemudian akan didifraksikan.
  - a. Jika sinar yang melewati kolimator (misalnya) memiliki panjang gelombang 600 nm yang kemudian diarahkan ke suatu kisi difraksi dengan 8000 garis/cm. Maka cobalah hitung sudut pada orde terang pertama!
  - b. Dapatkah kamu mendeskripsikan bagaimana mekanisme kerja XRF?
3. Apakah jarak antara pita terang/gelap dalam pola interferensi dua celah akan bertambah, berkurang, atau tetap sama, jika (a) jarak pemisah celah diperbesar, (b) warna berkas cahaya yang ditembakkan ditukar dari merah menjadi warna biru
4. Menurut pendapat kamu? Apakah inframerah dan X-ray dapat digunakan untuk menemukan orang hilang atau tersesat? Bagaimana mekanisme pemanfaatannya?



# BAB 4

## REKAYASA MATERIAL MELALUI PELAPISAN PERMUKAAN BAHAN (COATING)

### **Tujuan Pembelajaran**

Melalui pembahasan dalam bab ini, mahasiswa dapat:

1. Menjelaskan hubungan antara struktur material dengan sifat-sifatnya
2. Menjelaskan pengertian dan tujuan dari rekayasa material dalam kehidupan sehari-hari
3. Menguraikan metode-metode yang dapat dipakai dalam melakukan rekayasa material
4. Menganalisis proses rekayasa material melalui pelapisan bahan dengan menggunakan metode *thermal spray*, yaitu HVOF

### **Pendahuluan**

Dalam dunia industri, bahan atau material dasar yang digunakan dalam pembuatan suatu produk memainkan peranan yang sangat penting. Dalam bidang industri kemasan atau *packaging* makanan atau minuman misalnya, dibutuhkan sebuah material kemasan yang memiliki sifat tidak beracun, tidak bereaksi dengan produk di dalamnya, dapat melindungi dari kontaminasi lingkungan dan menjaga produk dari kerusakan fisik karena pengaruh lingkungan atau luar kemasan. Sementara dalam bidang industri logam,

umumnya dibutuhkan material yang memiliki sifat dasar tahan karat, tahan panas, keras dan juga kuat.

Kesesuaian antara bahan yang digunakan dalam membuat suatu produk dengan tujuan penggunaannya sangat penting karena berhubungan dengan keamanan produk dan waktu pakainya. Sayangnya, mendapatkan material dasar yang memiliki tingkat kesesuaian sangat tinggi dengan produk yang ingin dibuat seringkali sulit diperoleh. Misalnya saja pada pipa-pipa reaktor pembangkit listrik. Pipa reaktor yang diinginkan adalah pipa yang memiliki karakteristik kuat, tahan panas, tahan air dan juga tahan karat. Sifat kuat, tahan panas dan tahan air ini dimiliki oleh besi, sementara tidak dengan sifat tahan karatnya. Besi mudah sekali berkarat, sehingga pipa-pipa reaktor harus terus-menerus dirawat dan dilakukan penggantian jika sudah mengalami karat dan tidak bisa dipakai lagi.

Penggantian peralatan secara terus-menerus ketika mengalami kerusakan seperti halnya pipa reaktor tersebut tentu saja menimbulkan kerugian, baik secara ekonomi maupun lingkungan. Oleh karena itu, pada masa sekarang ini, peneliti dan para pelaku industri terus mencoba dan mencari inovasi bagaimana membuat suatu produk yang memiliki karakteristik sesuai dengan yang diinginkan. Nah, proses untuk membuat bahan dasar sesuai dengan karakteristik yang diinginkan dipelajari secara mendalam pada ilmu rekayasa material. Pada bidang ilmu ini, sifat dan karakter material sangat dipengaruhi oleh struktur mikro material tersebut.

Oleh karena itu, pada bab ini akan dibahas mulai dari struktur material dan sifat-sifatnya serta metode-metode rekayasa material.

Pada akhir bab juga akan dibahas secara singkat salah satu contoh teknologi yang digunakan dalam rekayasa material.

### **Struktur Material dan Karakteristiknya**

Secara umum material padat diklasifikasikan menjadi 3, yaitu logam, yang terdiri dari *ferrous* dan *non-ferrous*, non-logam, yang terdiri dari keramik dan polimer, serta komposit, yang merupakan kombinasi atau gabungan dari 2 bahan atau lebih yang tadi sudah disebutkan.

Jenis bahan yang akan dipilih untuk membuat suatu produk tergantung dari kesesuaian sifat yang dimiliki oleh bahan tersebut dengan tujuan pembuatan produk. Sifat-sifat bahan tersebut misalnya sifat fisik, sifat kimia, sifat *psycho-chemical*, sifat termal, sifat akustik, sifat elektrik, magnet dan optik dan sifat mekanik. Pada sifat fisik, karakteristik yang dipertimbangkan misalnya daya hantar panas, sifat tahan panas, viskositas, densitas, tegangan permukaan, daya hantar listrik, ataupun titik cair/ lebur. Pada sifat kimia, karakteristik yang dipertimbangkan adalah sifat tahan korosi (ketahanan bahan terhadap serangan air, gas, asam, larutan garam atau bahan kimia lain), komposisi, fasa material, ukuran butir, struktur mikro dan porositas. Selanjutnya pada sifat mekanik (kemampuan material untuk menahan beban), karakteristik yang dipertimbangkan adalah kekuatan, elastisitas, plastisitas, kekakuan, keuletan, resiliensi, ketangguhan, kekerasan, kelelahan, dan mulur. Sementara pada sifat dimensional, karakteristik yang dipertimbangkan adalah sifat mampu cor, sifat mampu bentuk panas, sifat mampu bentuk dingin, sifat mampu las, sifat mampu mesin dan sifat mampu keras.

---



Gambar 4.1. Ilustrasi susunan atom pada kristal (kiri) dan amorf (kanan)

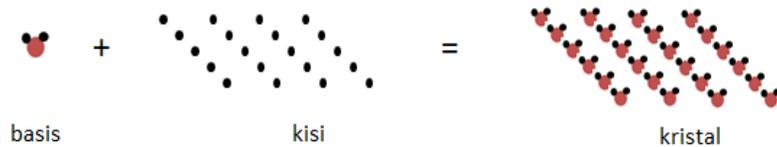
Sifat-sifat tersebut sangat bergantung pada jenis atom penyusun dan struktur dari material tersebut. Berdasarkan struktur atom penyusunnya, zat padat dibedakan menjadi kristal dan amorf. Pada kristal, molekul-molekul penyusunnya tersusun secara berulang dan teratur, sementara pada amorf, molekul-molekul penyusunnya tersusun secara acak. Contoh zat padat yang termasuk ke dalam kategori kristal adalah besi dan tembaga, sedangkan untuk kategori amorf contohnya adalah gelas dan plastik. Ilustrasi susunan atom pada kristal dan amorf diperlihatkan pada gambar 4.1.

Pada buku ini, bahan yang dibahas hanyalah bahan dengan struktur material kristal dan sifat daya hantar panas dan listriknya.

### 1. Struktur dan Kisi Kristal

Suatu zat padat dikatakan sebagai kristal ketika atom-atomnya tersusun dengan pola tertentu dan posisinya tetap secara periodik. Gambar 4.1 mengilustrasikan konsep dari kristal. Jarak di antara 2 atom terdekat pada arah  $x$  disebut  $a$  dan pada arah  $y$  disebut  $b$ . Sebuah kristal sempurna akan menjadi periodisitas atau repetitif dalam arah  $x$  dan  $y$  dari  $-\infty$  hingga  $\infty$ , sehingga pengamat dari sisi manapun akan mengamati bagian kristal dengan penampakan yang sama.

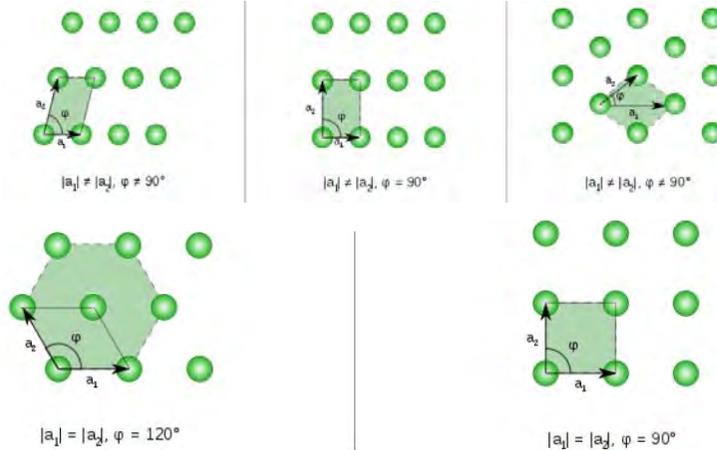
Struktur kristal merupakan struktur yang terdiri atas kisi dan basis. Kisi adalah susunan titik yang teratur dan periodik, sementara basis adalah gugus atom yang ditempatkan pada titik kisi. Gambaran kisi dan basis yang membentuk struktur kristal ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2. Struktur kristal yang terdiri atas kisi dan basis

Model kisi kristal dibedakan menjadi dua jenis, yaitu kisi bravais dan non-bravais. Kisi Bravais adalah suatu kisi khusus dimana semua titik kisinya ekuivalen, artinya semua titik memiliki lingkungan geometri yang tepat sama. Sementara pada kisi bukan Bravais atau non-Bravais, ada titik-titik kisi yang tidak ekuivalen.

Untuk model kisi dua dimensi (2D) ada 5 tipe dasar kisi, yaitu kisi miring (jajar genjang), kisi kotak (segi empat), kisi heksagonal, kisi persegi panjang, kisi persegi panjang terpusat. Deskripsi detail dan gambar tiap tipe kisi 2D tersebut ditunjukkan pada gambar 3.

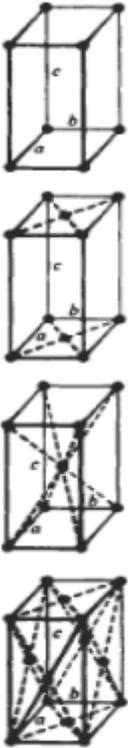
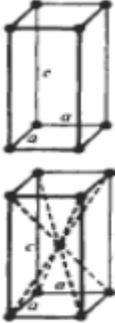
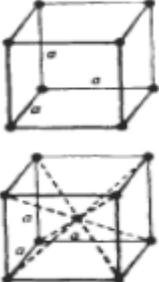


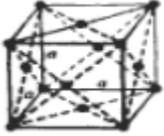
Gambar 4.3. Tipe kisi 2D

Sementara untuk model kisi tiga dimensi (3D) ada 7 tipe kisi dasar, dan dari tiap kisi dasar dapat dibedakan lagi menjadi beberapa tipe basis, sehingga diperoleh 14 tipe kisi 3 Dimensi seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Sistem 7 Tipe Kisi Kristal 3D yang Dibagi ke Dalam 14 Kisi Bravais

Sistem	Kisi Bravais	Karakteristik Sel Satuan	Gambar	Contoh
Triklinik	Simple	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$ $\neq 90^\circ$		Natrium Kromat ( $K_2CrO_7$ )
Monoklinik	Simple Base-centered	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\neq \gamma$		Gypsum ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ )

Sistem	Kisi Bravais	Karakteristik Sel Satuan	Gambar	Contoh
Orthorhombic	Simple Base- centere d Body- centere d Face- centere d	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta$ $= \gamma = 90^\circ$		Galium (Ga), Perovskite ( $CaTiO_3$ )
Tetragonal	Simple Body- centere d	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta$ $= \gamma = 90^\circ$		Timah Putih (Sn), Titanium Oksida ( $TiO_2$ )
Kubik	Simple Body- centere d Face- centere d	$a = b = c$ $\alpha = \beta$ $= \gamma = 90^\circ$		Tembaga (Cu), Perak (Ag), Natrium Klorida (NaCl)

Sistem	Kisi Bravais	Karakteristik Sel Satuan	Gambar	Contoh
				
Trigonal (rhombohedral)	Simple	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$		Kalsit ( $CaCO_3$ ), Arsenik (As), Bismuth (Bi)
Heksagonal	Simple	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$		Seng (Zn), Cadmium (Cd), kuartz ( $SiO_2$ )

Walaupun tidak pernah ada kristal yang sempurna, namun dalam pembahasan fisika zat padat, konsep kristal yang dipakai adalah kristal ideal, yaitu yang memiliki karakteristik sebagai berikut.

- Berukuran tak terhingga
- Tidak ada cacat geometrik
- Tidak ada ketidakmurnian (pengotor) kimiawi
- Atom-atomnya tidak mengalami getaran termal

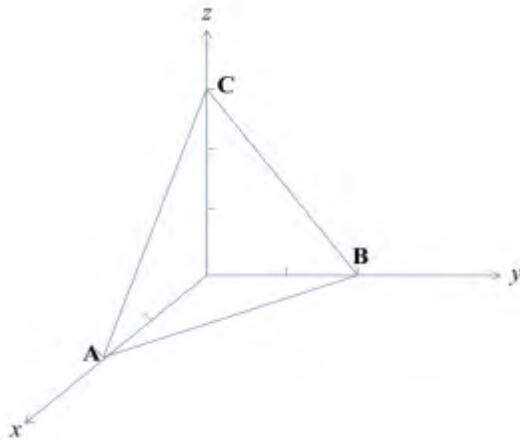
## 2. Arah dan Jarak Bidang Kristal

Arah bidang yang dibentuk dari titik-titik kisi sangat menentukan sifat dari kristal, oleh karena itu diperlukan sistem penomoran untuk dapat menyatakan arah bidang tersebut. Sistem penomoran tersebut dikenal dengan indeks Miller, sesuai dengan nama penemunya, yaitu W. H. Miller yang merupakan seorang ilmuwan yang berasal dari Inggris.

Indeks Miller dinyatakan dengan 3 bilangan bulat yang disimbolkan dengan 3 huruf h, k, l. Nilai dari h, k, l ini diperoleh dengan cara sebagai berikut.

- Tuliskan titik potong bidang yang ditinjau dengan sumbu x, y dan z
- Balik nilai-nilai titik potong bidang tersebut
- Samakan penyebut dari nilai pada langkah 2
- Nilai h, k, l nya adalah nilai pembilang pada langkah 3

Contohnya adalah penentuan indeks Miller dari bidang pada gambar 4 berikut.



Gambar 4.4. Potongan bidang kristal

Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut.

- Jika pada gambar 5 pertemuan sumbu x,y,z dinyatakan dengan titik 0, 0, 0, maka bidang A B C tersebut memotong sumbu x, y, dan z masing-masing pada titik 2, 2 dan 3. Maka pada langkah ini diperoleh nilai titik potong bidang pada sumbu adalah 2, 2 dan 3.
- Balik nilai potong bidang tersebut menjadi :  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{2}$ , dan  $\frac{1}{3}$

3. Samakan penyebutnya, maka menjadi  $\frac{3}{6}, \frac{3}{6}$  dan  $\frac{2}{6}$
4. Nilai h, k, l nya adalah pembilangan dari langkah nomor 3, yaitu 3, 3, 2.

Selanjutnya adalah menentukan jarak antar bidang kristal yang dinyatakan dengan  $d_{hkl}$ . Persamaan  $d_{hkl}$  untuk sistem orthogonal dan kubik masing-masing ditunjukkan pada persamaan 4.1 dan 4.2.

$$\frac{1}{d_{hkl}} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (\text{pers.4.1})$$

$$\frac{1}{d_{hkl}} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (\text{pers.4.2})$$

Dengan a, b, dan c adalah panjang vektor basis pada sumbu x, y dan z.

### 3. Elektron dalam Kristal

Suatu kristal tersusun atas basis yang merupakan sebuah atom atau kumpulan atom. Atom-atom tersebut tersusun atas proton dan neutron yang berada pada inti dan elektron-elektron yang mengelilinginya. Ada dua keadaan elektron dalam mengelilingi inti atom, yaitu terikat kuat terhadap inti atau bergerak bebas. Elektron-elektron yang bergerak bebas inilah yang disebut dengan elektron valensi dan berperan besar terhadap sifat-sifat bahan, seperti sifat kimia, ikatan atom, daya hantar dan sifat optisnya.

Zat padat yang didominasi oleh elektron bebas adalah logam. Pada logam, elektron valensi ini disebut dengan elektron konduksi dan bertanggung jawab terhadap sifat konduktivitasnya. Struktur kristal logam merupakan perpaduan ion positif yang tidak bergerak pada titik kisi dan

elektron-elektron yang bebas bergerak di antara ion-ion tersebut.

Dalam bahasan zat padat, elektron dimodelkan sebagai elektron bebas dan elektron dalam potensial periodik. Elektron bebas ini pun ditinjau berdasarkan teori klasik dan teori kuantum.

#### **a. Elektron Bebas Klasik**

Menurut Drude, elektron-elektron valensi yang bebas mengembara pada logam ini dimisalkan sebagai gas elektron. Banyaknya elektron valensi dalam logam tersebut dapat dicari menggunakan persamaan berikut.

$$n = \frac{N}{V} \quad (\text{pers. 4.3})$$

dengan  $N$  adalah banyaknya atom dalam logam dan  $V$  adalah volume logam. Jika rapat massa unsur logam tersebut adalah  $\rho_m$ , massa atom adalah  $M$  dan setiap atom membawa elektron valensi sebanyak  $Z_v$ , maka banyak elektron valensi per senti meter kubik dapat dijabarkan menjadi sebagai berikut.

$$n = Z_v \frac{\rho_m N_A}{M} \quad (\text{pers. 4.4})$$

$N_A$  adalah bilangan Avogadro yang besarnya  $6,022 \times 10^{23}$ .

Ketika tidak ada medan listrik yang bekerja pada logam, elektron-elektron bebas dalam logam akan bergerak secara acak dan bebas dengan arah sembarang, sehingga rata-rata kecepatan dari seluruh elektron tersebut adalah nol dan tidak ada arus yang ditimbulkan. Namun, ketika logam diberikan medan listrik, elektron-elektron bebas akan tertarik untuk bergerak berlawanan arah dengan arah

---

medan, sehingga timbullah arus listrik  $I$ , yang besarnya sebanding dengan beda potensial  $V$  dan berbanding terbalik dengan hambatan jenis bahan  $R$  sesuai dengan hukum ohm :

$$V = IR \quad (\text{pers. 4.5})$$

Elektron-elektron ini bergerak pada logam dengan panjang  $L$  dan luas penampang  $A$ , sehingga menimbulkan rapat arus  $J$  menurut persamaan :

$$J = \frac{I}{A} \quad (\text{pers. 4.6})$$

Rapat arus  $J$  tersebut timbul sejajar dengan arah gerak elektron yang memiliki kecepatan  $v$ . Jika banyaknya elektron yang bergerak per satuan luas adalah  $n$ , maka dalam waktu  $dt$ , akan ada  $n (v dt) A$  elektron yang bergerak sejauh  $v dt$  dalam rentang waktu  $dt$  yang melintasi luasan  $A$  tegak lurus  $v$ . Elektron-elektron ini akan membawa muatan  $-e$ . Jika  $I$  didefinisikan dengan banyaknya muatan per satuan waktu, maka persamaan 4.6 dapat diuraikan sebagai berikut.

$$J = \frac{dq}{dt A} \quad (\text{pers. 4.7})$$

$$J = \frac{-e n v dt A}{dt A} \quad (\text{pers. 4.8})$$

$$J = -e n v \quad (\text{pers. 4.9})$$

Kecepatan rata-rata atau sering disebut juga dengan kecepatan drift atau kecepatan hanyut  $v$  dari elektron-elektron bebas tersebut diperoleh melalui persamaan.

$$v_{drift} = \frac{-e E \tau}{m} \quad (\text{pers. 4.10})$$

dengan  $\tau$  adalah waktu rata-rata antara dua tumbukan elektron dengan ion. Dengan memasukkan persamaan 10 ke persamaan 9, diperoleh :

$$J = \frac{e^2 n \tau}{m} E \quad (\text{pers. 4.11})$$

Karena  $J$  bisa dinyatakan dengan  $J = \sigma E$ , maka konduktivitas listrik  $\sigma$  bisa dinyatakan sebagai :

$$\sigma = \frac{e^2 n \tau}{m} \quad (\text{pers. 4.12})$$

Nilai  $\sigma$  ini berbanding terbalik dengan resistivitas ( $\rho$ ), yaitu  $\sigma = \frac{1}{\rho}$ . Sementara nilai hambatan ( $R$ ) tidak hanya dipengaruhi oleh  $\rho$ , tetapi juga geometri dari bahan tersebut. Secara matematis dinyatakan dengan persamaan:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\text{pers. 4.13})$$

Sebelumnya telah disebutkan bahwa struktur kristal logam merupakan perpaduan ion positif yang tidak bergerak pada titik kisi dan elektron-elektron yang bebas bergerak di antara ion-ion tersebut. Walau dikatakan tidak bergerak, tetapi sebenarnya ion-ion logam yang berada di titik kisi bergetar di sekitar titik kesetimbangannya. Getaran ini disebabkan oleh adanya energi termal, yaitu energi panas yang dimiliki oleh atom-atom tersebut. Oleh Dulong dan Petit (1819), getaran pada kisi tersebut diidentikan dengan gerakan pada osilator harmonik. Pada osilator harmonik, energi total yang dimiliki osilator merupakan penjumlahan dari energi kinetik dan potensialnya :

$$E = Ek + Ep \quad (\text{pers. 4.14})$$

---

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 \quad (\text{pers. 4.15})$$

dengan  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , maka persamaan 4.15 dapat dinyatakan menjadi

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}\omega^2mx^2 \quad (\text{pers. 4.16})$$

$$E = \frac{1}{2}m(v^2 + \omega^2x^2) \quad (\text{pers. 4.17})$$

dengan menggunakan distribusi Maxwell-Boltzmann, harga rata-rata energinya dapat diselesaikan dengan persamaan :

$$\langle E \rangle = \frac{\int_{v=0}^{vm} \int_{x=0}^{xm} E \cdot \exp\left(-\frac{E}{k_oT}\right) dv dx}{\int_{v=0}^{vm} \int_{x=0}^{xm} \exp\left(-\frac{E}{k_oT}\right) dv dx} \quad (\text{pers. 4.18})$$

sehingga :

$$\langle E \rangle = k_oT \quad (\text{pers. 4.19})$$

Atom-atom dalam kristal membentuk susunan tiga dimensi. Jika ada N atom dalam ruang tersebut maka energi totalnya menjadi :

$$E = 3 N_A k_oT \quad (\text{pers. 4.20})$$

$$E = 3 RT \quad (\text{pers. 4.21})$$

Kapasitas panasnya :

$$C_v = \frac{dE}{dT} \quad (\text{pers. 4.21})$$

$$C_v = 3R \quad (\text{pers. 4.22})$$

Persamaan 4.22 merupakan kapasitas panas yang hanya mempertimbangkan energi dari getaran atom. Sementara pada logam, ketika elektron-elektron bebas menjadi penyusun logam, maka energi dari elektron-elektron juga

---

perlu dimasukkan ke dalam perhitungan kapasitas panas bahan logam. Untuk atom yang membawa sebanyak  $Z_v$  elektron valensi pada suhu  $T$ , maka energi rata-ratanya :

$$E = Z_v \frac{3}{2} N_A k_o T \quad (\text{pers. 4.23})$$

$$E = \frac{3}{2} Z_v RT \quad (\text{pers. 4.24})$$

Dan kapasitas panasnya menjadi :

$$C_v = \frac{dE}{dT} = \frac{3}{2} Z_v R \quad (\text{pers. 4.25})$$

Maka kapasitas panas totalnya merupakan gabungan dari kapasitas panas dari fonon dan elektron :

$$C_{v \text{ total}} = C_{v \text{ fonon}} + C_{v \text{ elektron}} \quad (\text{pers. 4.26})$$

$$C_{v \text{ total}} = 3R + \frac{3}{2} Z_v R \quad (\text{pers. 4.27})$$

Persamaan 4.27 menunjukkan bahwa kapasitas panas dari bahan logam bernilai 1,5 kali lebih besar daripada kapasitas panas bahan isolator. Namun, pada kenyataannya, kapasitas panas bahan logam pada suhu tinggi dan suhu ruang bernilai sama dengan kapasitas bahan isolator, yaitu  $3R$ .

Jika benda padat tersebut diberikan panas, sehingga terjadi perbedaan suhu  $\frac{\partial T}{\partial x}$  di sepanjang sumbu  $x$ , maka akan terjadi aliran energi panas  $Q$ , yang besarnya :

$$Q = -K \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{pers. 4.28})$$

Dengan  $K$  adalah konduktivitas termal. Pada bahan isolator, panas dialirkan oleh fonon, sementara pada logam, panas dialirkan oleh fonon dan juga elektron bebas. Elektron bebas pada logam ini memberikan kontribusi

transfer panas yang jauh lebih besar dibandingkan dengan yang dilakukan oleh fonon, yaitu  $K_{fonon} = 10^{-2}K_{elektron}$ , sehingga dalam perhitungan konduktivitas panas logam, hanya mempertimbangkan konduktivitas panas yang berasal dari elektron. Dengan menggunakan pendekatan teori kinetik gas, konduktivitas logam dapat diperoleh melalui persamaan :

$$K = \frac{1}{3}C_v v l \quad (\text{pers. 4.29})$$

dengan  $C_v$  adalah kapasitas panas,  $v$  adalah kecepatan rata-rata partikel dan  $l$  adalah lintasan bebas rata-rata partikel. Nilai  $C_v$ ,  $v$ , dan  $l$  dapat disubstitusi dengan menggunakan persamaan-persamaan yang sudah disebutkan di atas, sehingga dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$K = \frac{3}{2} \frac{nk^2 T \tau}{m_o} \quad (\text{pers. 4.30})$$

Jika dibandingkan persamaan konduktivitas termal dengan konduktivitas listrik, maka diperoleh ungkapan persamaan :

$$\frac{K}{\sigma} = \frac{3}{2} \left( \frac{k}{e} \right)^2 T \quad (\text{pers. 4.31})$$

Nilai perbandingan ini sesuai dengan penemuan empiris yang dilakukan oleh Wiedaman-Frans (1583). Namun hukum ini hanya sesuai pada pengamatan untuk suhu tinggi dan rendah, sementara pada suhu menengah, persamaan ini tidak sesuai. Oleh karena itu, teori elektron bebas klasik ini hanya dapat dipakai untuk menjelaskan hukum Ohm, perilaku elektron bebas yang mempengaruhi konduktivitas termal dan listrik. Sementara perhitungan

---

besar dan nilainya diperlukan pendekatan lain, yaitu menggunakan teori kuantum.

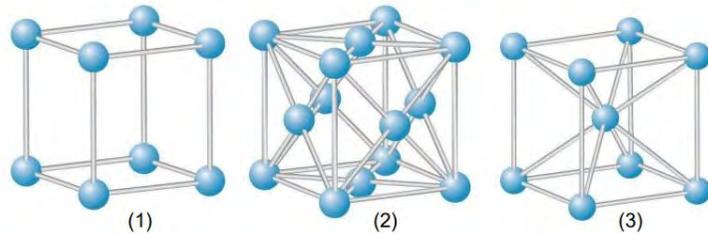
### **b. Ikatan Kristal**

Kristal merupakan zat padat yang memiliki atom dengan susunan pola tertentu dan memiliki gaya ikat antar atom. Munculnya gaya ikat pada atom ini diakibatkan oleh adanya muatan listrik yang dimiliki atom. Gaya ikat dapat disebut juga sebagai gaya kohesi yaitu besarnya energi yang dibutuhkan untuk memecah kristal menjadi atom netral yang bebas. Kristal dapat mengalami ikatan ionik, ikatan kovalen, ikatan logam, ikatan van der waals dan ikatan hidrogen.

#### 1) Ikatan ionik

Ikatan ionik pada kristal disebabkan oleh gaya tarik-menarik antara ion positif dan ion negatif sehingga terjadi penyerahan elektron antar atom yang berinteraksi. Beberapa bahan kristal yang dapat mengalami ikatan ionik diantaranya NaCl, CsCl, KBr dan NaI. Atom-atom yang dapat berikatan tersebut berasal dari golongan I dan golongan VII A. Pada ikatan ionik, atom tidak memiliki elektron bebas. Hal ini menyebabkan penggunaan bahan yang mengalami ikatan ionik akan memiliki konduktivitas yang buruk. Karakteristik lainnya dari zat padat yang mengalami ikatan ionik yaitu memiliki kemampuan untuk menyerap sinar inframerah namun tembus cahaya radiasi tampak dan dapat larut dalam zat cair polar, contohnya air. Selain itu, kristal kubik yang dibentuk

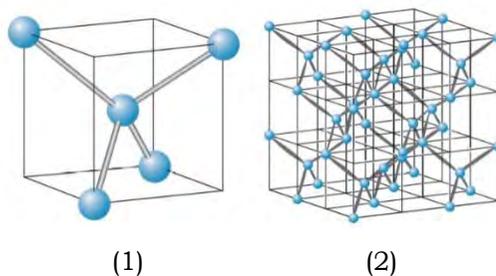
oleh zat padat yang berikatan ionik bersifat keras dan relative stabil.



Gambar 4.5. Struktur kristal (1) simple cubic crystal (2) face-centered cubic (NaCl) (3) body-centered cubic (CsCl).

## 2) Ikatan Kovalen

Ikatan kovalen adalah ikatan yang terjadi karena pemakaian bersama elektron-elektron atom yang berikatan. Atom-atom dapat berikatan disebabkan oleh perbedaan nilai elektronegatifitas yang kecil. Ikatan kovalen memiliki konduktivitas dan termal yang buruk dan tembus cahaya seperti sifat zat padat ikatan ionik. Namun, jika dibandingkan dengan zat padat yang mengalami ikatan ionik, ikatan kovalen memiliki struktur yang lebih keras dan energi ikatnya lebih besar dan tidak larut dalam zat cair biasa. Contoh struktur kristal dengan ikatan kovalen dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. (1) Struktur tetrahedral dari karbon dan (2) struktur kisi dari intan

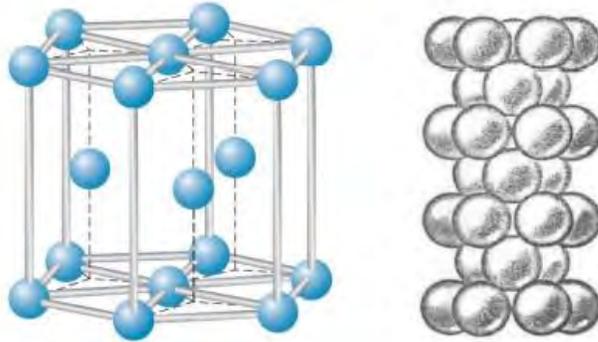
Beberapa kristal yang memiliki ikatan kovalen dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2. Zat Padat Kovalen

Kristal	Jarak tetangga terdekat	Energi kohesiv (eV)
ZnS	0,235	6,32
C	0,154	6,32
Si	0,234	4,63
Ge	0,244	3,85
Sn	0,280	3,14
SiC	0,189	12,3

### 3) Ikatan logam

Ikatan logam terjadi akibat gaya tarik-menarik elektrostatik antara ion positif dengan awan elektron. Energi kohesif pada ikatan logam berada pada rentang 1-3 eV, lebih kecil jika dibandingkan dengan zat padat yang mengalami ikatan ionik dan ikatan kovalen sehingga logam memiliki interaksi yang kuat dengan cahaya tampak dan menyebabkan logam tidak tembus cahaya. Setiap logam mempunyai elektron valensi (elektron terluar) yang sangat mudah bergerak sehingga memiliki konduktivitas listrik dan termal yang tinggi. Ikatan logam dapat terjadi antar logam seperti Na, Fe, Cu dan lain-lain. Struktur kristal logam yang paling umum adalah fcc, bcc, atau hcp (hexagonal close packed).



Gambar 4.7. Struktur atom dalam kristal heksagonal terpadatkan-rapat (hcp)

4) Ikatan Van Der Waals

Gaya Van Der Waals adalah gaya tarik-menarik yang disebabkan oleh interaksi antar dipol sebagai akibat dari distribusi muatan yang tidak simetris. Perubahan atom menjadi dipol-dipol listrik merupakan penyimpangan akibat distorsi pada distribusi elektron dalam orbital kulit penuh yang berbentuk simetri bola yang dialami oleh atom-atom gas inert (gas mulia). Ikatan Van der Waals dapat terjadi antar atom gas mulia (gas inert), seperti He, Ar, Ne dan lain-lain. Sifat dari ikatan Van der Waals yaitu memiliki titik lebur dan titik larut rendah, lunak dan larut dalam cairan kovalen.

5) Ikatan Hidrogen

Ikatan hidrogen terjadi antara atom hidrogen dengan atom lain yang memiliki keelektronegatifan tinggi yaitu yang memiliki pasangan elektron bebas seperti atom N, O atau F. Pada ikatan hidrogen, atom H bersifat sebagai ion positif dan hanya dapat berikatan dengan sebuah atom lain karena hanya memiliki satu elektron.

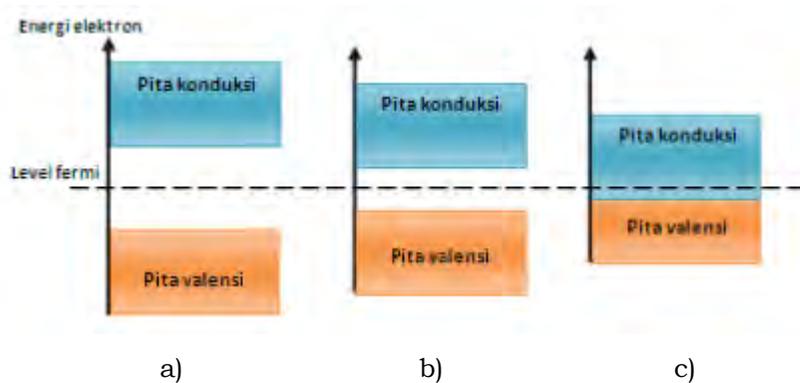
Namun, pada keadaan tertentu atom hidrogen dapat juga berikatan kuat dengan dua buah atom. Jika dibandingkan dengan ikatan van der Waals, ikatan hidrogen memiliki titik lebur dan titik didih lebih tinggi.

### **c. Pita Energi**

Pada model elektron bebas, elektron-elektron valensi dianggap dapat bergerak bebas dalam kristal tanpa adanya penghalang apapun, kecuali permukaan kristal itu sendiri. Namun pada kenyataannya, ada energi potensial yang timbul dari interaksi inti dengan elektron dan juga elektron dengan elektron, sehingga membatasi ruang gerak elektron. Besarnya energi potensial ini merupakan fungsi posisi elektron yang dapat bernilai dari 0 hingga tak hingga dan merupakan sebuah fungsi periodik yang sering dinyatakan sebagai fungsi gelombang. Fungsi gelombang menggambarkan gerak elektron dalam daerah-daerah energi potensial dimana terdapat daerah yang dapat diduduki dan tidak dapat diduduki oleh elektron. Daerah-daerah ini kemudian yang menjadi landasan atau dasar konsep pita energi. Pita energi menggambarkan daerah yang dapat dan tidak dapat diduduki oleh elektron.

Konsep pita energilah yang digunakan untuk menjelaskan konduktivitas pada material secara lebih detail. Pada pembahasan sebelumnya kita membagi material menjadi 2 jenis, yaitu konduktor dan isolator. Konduktor memiliki resistivitas  $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ , sementara isolator memiliki resistivitas  $10^{14} - 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ . Lebarnya rentang nilai isolator dan konduktor ini memunculkan jenis material lain, yaitu semikonduktor, yang memiliki nilai resistivitas  $10^{-2} - 10^9$

$\Omega$ .cm. Hal ini karena pada model elektron bebas tidak mampu menjelaskan tentang material semikonduktor, dan konsep pita energilah yang digunakan untuk menjelaskannya. Penggambaran pita energi pada ketiga material tersebut ditunjukkan pada gambar 4.8.



Gambar 4.8. Pita energi pada material a) isolator, b) semikonduktor dan c) konduktor

### 1) Teorema dan Fungsi Bloch

Energi potensial yang timbul dari interaksi elektron dengan inti dapat membatasi pergerakan elektron di dalam kristal. Pergerakan elektron tersebut pada ruang 1 dimensi dan dalam energi potensial yang nilainya tetap  $U_0$  dapat dinyatakan dengan persamaan Schrodinger.

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U_0)\psi(x) = 0 \quad (\text{pers. 4.32})$$

Namun, oleh Bloch, seorang ilmuwan Swiss, energi potensial tersebut dinyatakan sebagai fungsi periodik  $U(\vec{r})$ , sehingga persamaan gerak elektron pada ruang 1 dimensi dan arah  $\vec{r}$  menjadi

$$\frac{d^2\psi(\vec{r})}{d\vec{r}^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U(\vec{r}))\psi(\vec{r}) = 0 \quad (\text{pers. 4.33})$$

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dr^2} + U(\vec{r}) \right] \psi(\vec{r}) = E\psi(\vec{r}) \quad (\text{pers. 4.34})$$

Solusi persamaan tersebut berupa gelombang datar

$$\psi(\vec{r}) = u(\vec{r})e^{ik\vec{r}} \quad (\text{pers. 4.35})$$

dengan  $k$  adalah vektor gelombang yang berbentuk.

Persamaan 4.35 ini merupakan persamaan fungsi gelombang Bloch, yang harus memenuhi syarat batas periodik

$$u(\vec{r} + a) = u(\vec{r}) \quad (\text{pers. 4.36})$$

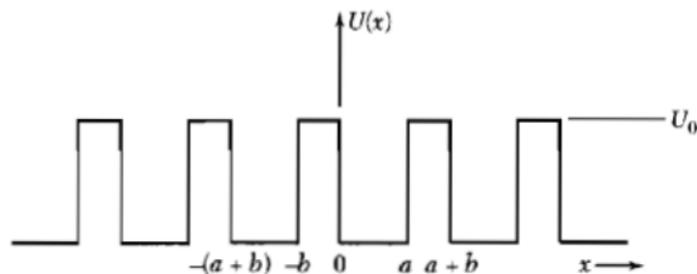
dan

$$\psi(\vec{r} + a) = \psi(\vec{r}) \quad (\text{pers. 4.37})$$

dengan  $a$  adalah vektor translasi kisi dan menunjukkan bahwa fungsi gelombang  $\psi$  sama untuk tiap titik-titik kisi yang ekuivalen dalam kristal.

## 2) Model Kronig-Penney

Pada model Kronig-Penney, energi potensial yang membatasi gerak elektron digambarkan dalam sebuah sumur potensial kotak, yang juga merupakan potensial periodik.



Gambar 4.8. Model sumur potensial kotak Kronig-Penney

Sumur potensial kotak tersebut memiliki lebar  $a$  dan dipisahkan oleh penghalang energi yang lebarnya  $b$  dan tinggi  $U_0$ , sehingga persamaan Schrodinger pada model Kronig-Penney dapat dibagi menjadi dua daerah. Untuk daerah  $0 < x < a$  :

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E)\psi(x) = 0 \quad (\text{pers. 4.38})$$

dan untuk daerah  $-b < x < 0$  :

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U_0)\psi(x) = 0 \quad (\text{pers. 4.39})$$

Kedua persamaan pada dua daerah tersebut berulang secara periodik di seluruh  $x$ , sehingga solusi kedua persamaan tersebut adalah

$$\psi = Ae^{i\alpha x} + Be^{-i\alpha x} \text{ untuk daerah } 0 < x < a, \quad (\text{pers. 4.40})$$

dan

$$\psi = Ce^{i\beta x} + De^{-i\beta x} \text{ untuk daerah } -b < x < 0 \quad (\text{pers. 4.41})$$

$$\text{dengan } \alpha^2 = \frac{2m}{\hbar^2}E \text{ dan } \beta^2 = \frac{2m}{\hbar^2}(U_0 - E)$$

dengan menggunakan syarat batas  $\psi(-b < x < 0) = \psi(a < x < a + b)$ , maka:

$$A + B = C + D$$

$$i\alpha(A - B) = \beta(C - D)$$

dengan memasukkan nilai  $x = a$  dan  $-b$ , pada persamaan 4.40 dan 4.41, maka persamaan pada batas sumur potensial  $a$  dan  $-b$  dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Ae^{i\alpha a} + Be^{-i\alpha a} = (Ce^{-\beta b} + De^{\beta b})e^{i\alpha(a+b)} \quad (\text{pers. 4.42})$$


---

$$i\alpha(Ae^{i\alpha a} - Be^{-i\alpha a}) = \beta(Ce^{-\beta b} - De^{\beta b})e^{ik(a+b)} \quad (\text{pers. 4.43})$$

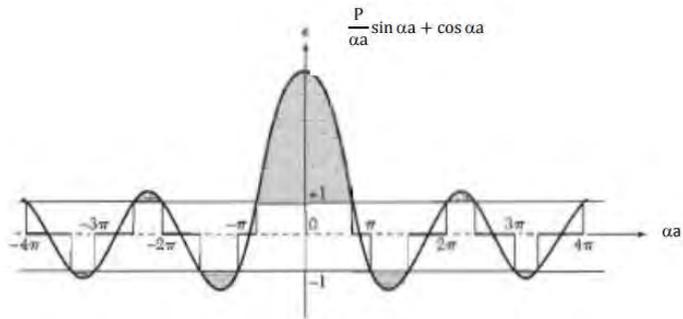
dan dituliskan kembali menjadi

$$\left[\beta^2 - \frac{\alpha^2}{2\beta\alpha}\right] \sinh \beta b \sin \alpha a + \cosh \beta b \cos \alpha a = \cos k(a+b) \quad (\text{pers. 4.44})$$

Persamaan 4.44 dimodifikasi menjadi sebuah deret sumur tipis dengan  $U_0$  mendekati tak hingga dan  $b$  menuju 0, namun hasil kali  $U_0 b$  bernilai berhingga (tertentu). Pada saat  $b \rightarrow 0$ ,  $\beta \gg \alpha$  dan  $\beta b \ll 1$ , serta  $P = \beta^2 \frac{ba}{2}$ , maka persamaan 4.44 menjadi

$$\frac{P}{\alpha a} \sin \alpha a + \cos \alpha a = \cos ka \quad (\text{pers. 4.45})$$

dengan  $k = \pm \frac{\pi}{a}$ . Grafik persamaan 4.45 diilustrasikan pada gambar 4.9 sebagai berikut.

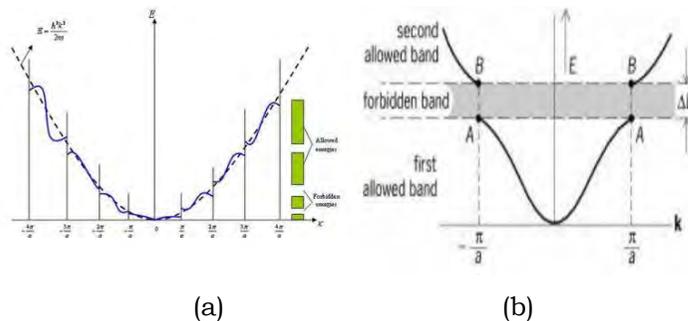


Gambar 4.9. Grafik persamaan Kronig-Penney model sumur potensial kotak

Berdasarkan gambar 4.9, grafik hanya memiliki bentuk penyelesaian untuk nilai  $\cos ka = \pm 1$ . Daerah yang berada diatas 1 atau dibawah -1 adalah daerah terlarang yang disebut *band gap*, sedangkan daerah diantara 1 dan -1 adalah daerah yang diperbolehkan terdapat elektron didalamnya. Kesimpulan yang diperoleh tentang pembagian daerah yaitu:

- a) Spektrum energi elektron terdiri dari pita-pita energi yang diijinkan dan pita-pita yang terlarang.
  - b) Lebar pita energi yang diijinkan sebanding dengan nilai  $(\alpha a)$ , artinya makin besar nilai  $(\alpha a)$  makin makin besar pula lebar pita energi.
  - c) Lebar suatu pita energi yang diijinkan berbanding terbalik dengan nilai  $P$ , yaitu dengan energi ikat elektron. Makin besar  $P$  makin kecil lebar pita energi yang diijinkan.
- 3) Model Elektron Hampir Bebas

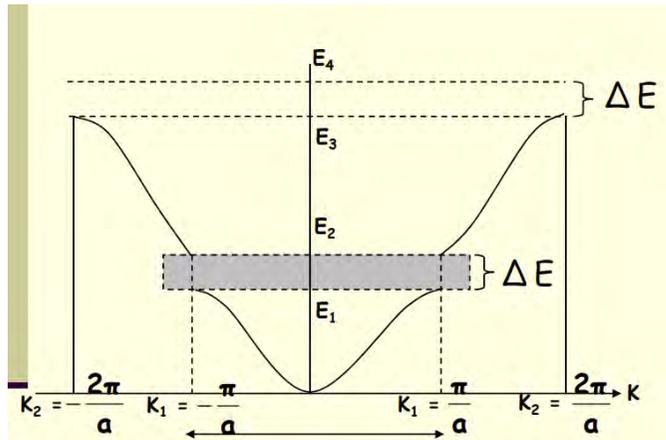
Menurut model elektron bebas, energi yang dimiliki elektron dapat bernilai sembarang, mulai dari nol sampai tak hingga untuk setiap nilai  $k$ . Sedangkan untuk model elektron hampir bebas, elektron tidak lagi kontinu untuk semua  $k$ , tetapi tepat pada nilai-nilai  $k$  tertentu energi elektron mengalami diskontinu, yaitu pada nilai  $k = \pm \frac{n\pi}{a}$ , dimana  $n = 1, 2, 3$  dan seterusnya.



Gambar 4.10. Energi sebagai fungsi gelombang menurut (a) elektron bebas (b) elektron hampir bebas

Model elektron bebas gagal digunakan untuk menjelaskan perbedaan antara konduktor, semikonduktor, isolator dan superkonduktor karena energi yang dimiliki elektron kontinu sehingga tidak

ada energi gap (celah energi). Pada model elektron hampir bebas daerah dari  $-\pi/a$  hingga  $\pi/a$  disebut Brillouin pertama. Celah energi pertama terjadi untuk nilai  $k = \pm \frac{\pi}{a}$ . Celah energi lainnya terjadi untuk nilai  $k$  yang merupakan kelipatan dari  $k = \pm \frac{\pi}{a}$ . Daerah  $\Delta E$  merupakan daerah celah terlarang atau daerah yang tidak boleh ditempati oleh elektron.



Gambar 4.11. Daerah Brillouin pertama

Fungsi gelombang di  $k = \pm \frac{\pi}{a}$  merupakan persamaan gelombang berdiri yang diturunkan dari persamaan gelombang berjalan, yaitu:

$$\psi(+) = e^{i\pi x/a} + e^{-i\pi x/a} = 2\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (\text{pers. 4.46})$$

dan

$$\psi(-) = e^{i\pi x/a} - e^{-i\pi x/a} = 2\sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (\text{pers. 4.47})$$

Kedua fungsi gelombang  $\psi(+)$  dan  $\psi(-)$  merupakan elektron di dua tempat yang berbeda, dan karena itu kedua kelompok elektron itu memiliki nilai energi

potensial yang berbeda. Rapat peluang kedua fungsi gelombang adalah:

$$\rho(+) = \psi^*(+)\psi(+) = |\psi(+)|^2 = 4\cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (\text{pers. 4.48})$$

$$\rho(-) = \psi^*(-)\psi(-) = |\psi(-)|^2 = 4\sin^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \quad (\text{pers. 4.49})$$

Persamaan 4.48 menjelaskan elektron ditumpukkan di atas ion positif yang dipusatkan pada titik  $x = 0, \pm a, \pm 2a, \pm 3a$  dst. Jadi elektron berada pada daerah yang energi potensialnya rendah. Sedangkan persamaan 4.49 menjelaskan elektron ditumpukkan di tengah-tengah antara ion positif, sehingga elektron ini memiliki energi potensial yang tinggi. Ternyata kedua solusi ini menumpuk elektron pada daerah yang berlainan relatif terhadap kedudukan ion-ionnya sehingga energi potensialnya berbeda. Hal inilah yang menimbulkan loncatan energi, sehingga timbul celah energi pada  $k = \pm \frac{\pi}{a}$ . Besar energi potensial di titik  $x$  adalah  $U(x) = U\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)$ . Untuk besar celah energinya yaitu:

$$E_g = \int_0^1 dx U(x) [|\psi(+)|^2 - |\psi(-)|^2]$$

$$E_g = \int_0^1 dx U \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \left[ \left| \sqrt{2} \cos \frac{\pi x}{a} \right|^2 - \left| \sqrt{2} \sin \frac{\pi x}{a} \right|^2 \right]$$

$$E_g = 2 \int_0^1 dx U \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \left[ \left| \cos \frac{\pi x}{a} \right|^2 - \left| \sin \frac{\pi x}{a} \right|^2 \right]$$

$$E_g = 2U \int_0^1 dx \cos^2\left(\frac{2\pi x}{a}\right) = U \quad (\text{pers. 4.50})$$

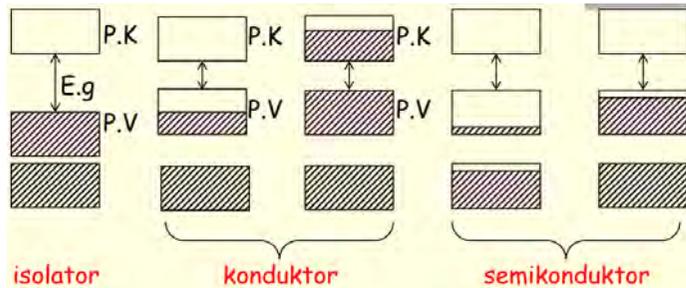
**d. Strukur Pita energi**

Material dapat dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu isolator, konduktor dan semikonduktor. Ketiga material tersebut memiliki struktur pita energi yang berbeda-beda, yaitu terdiri atas pita valensi, celah energi dan pita konduksi yang dapat digambarkan dalam tingkat energi yang berbeda untuk elektron-elektron di dalam bahan. Pita valensi adalah pita energi yang akan diisi oleh elektron valensi sedangkan pita konduksi adalah pita energi yang terletak di atas pita valensi dan akan diisi oleh elektron konduksi. Sementara celah energi merupakan energi yang diperlukan elektron untuk melompat dari pita valensi ke pita konduksi, sehingga pada celah energi tidak dapat diduduki oleh elektron.

Material isolator memiliki karakteristik berupa pita valensi yang terisi penuh elektron valensi dan pada pita konduksi kosong tidak memiliki elektron valensi sama sekali. Kekosongan pita konduksi pada material isolator disebabkan oleh besarnya celah energi, sehingga elektron tidak bisa bebas bergerak. Sedangkan pada material konduktor akan memiliki elektron valensi pada pita energi bagian teratasnya sehingga energi elektron dapat berubah secara kontinu.

Selanjutnya terdapat material semikonduktor yang dapat berperilaku seperti isolator dan konduktor. Semikonduktor akan berperilaku seperti isolator pada temperatur rendah dan sebaliknya pada temperatur tinggi semikonduktor akan menjadi konduktor karena elektron yang berada di pita valensi memperoleh energi kinetik akibat kenaikan

temperatur sehingga mampu melompat menuju pita konduksi. Celah energi yang terdapat antara pita valensi dan pita konduksi pada material semikonduktor lebih kecil jika dibandingkan dengan material isolator.



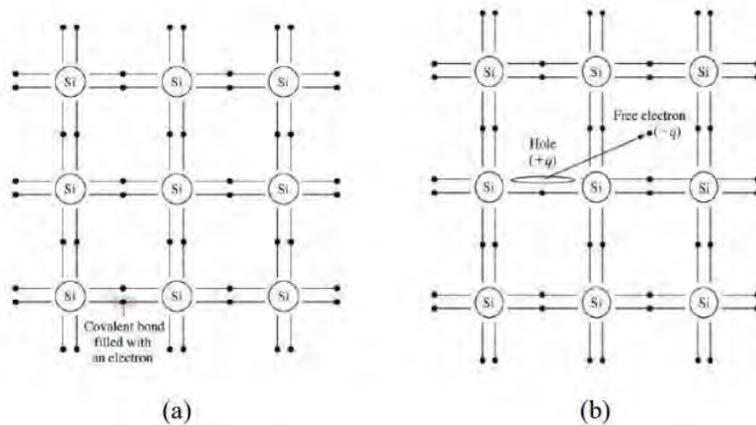
Gambar 4.12. Pita energi material (a) isolator, (b) semikonduktor dan (c) konduktor

Pemanfaatan bahan semikonduktor sebagai bahan baku divais elektronik harus sesuai dengan karakteristik fisis dari bahan baik dari sifat listrik maupun sifat optiknya. Unsur yang pertama kali diteliti sebagai bahan semikonduktor adalah germanium (Ge), namun saat ini silicon (Si) lebih banyak digunakan sebagai bahan baku material semikonduktor karena jumlahnya yang melimpah. Selain germanium (Ge) dan silikon (Si) material lain yang diteliti sebagai bahan semikonduktor adalah paduan dari golongan II-VI atau III-V dalam tabel periodik baik binary (paduan 2 unsur) maupun ternary (paduan 3 unsur) seperti ZnO, GaN, AlN, InN, GaAs, GaSb, AlGaIn, AlGaInSb, GaInAs dan sebagainya.

		IIIA	IVA	VA	VIA				
5	10.811	6	12.01115	7	14.0067	8	15.9994		
	<b>B</b>		<b>C</b>		<b>N</b>		<b>O</b>		
	Boron		Carbon		Nitrogen		Oxygen		
	13	26.9815	14	28.086	15	30.9738	16	32.064	
	<b>Al</b>		<b>Si</b>		<b>P</b>		<b>S</b>		
	Aluminum		Silicon		Phosphorus		Sulfur		
<b>IIIB</b>									
30	65.37	31	69.72	32	72.59	33	74.922	34	78.96
	<b>Zn</b>		<b>Ga</b>		<b>Ge</b>		<b>As</b>		<b>Se</b>
	Zinc		Gallium		Germanium		Arsenic		Selenium
48	112.40	49	114.82	50	118.69	51	121.75	52	127.60
	<b>Cd</b>		<b>In</b>		<b>Sn</b>		<b>Sb</b>		<b>Te</b>
	Cadmium		Indium		Tin		Antimony		Tellurium
80	200.59	81	204.37	82	207.19	83	208.980	84	(210)
	<b>Hg</b>		<b>Tl</b>		<b>Pb</b>		<b>Bi</b>		<b>Po</b>
	Mercury		Thallium		Lead		Bismuth		Polonium

Gambar 4.13. Unsur-unsur yang digunakan sebagai bahan semikonduktor

Atom-atom penyusun bahan semikonduktor letaknya berdekatan sehingga dapat saling berikatan satu sama lain. Ikatan kristal yang dapat terbentuk pada semikonduktor adalah ikatan kovalen.



Gambar 4.14. Gambaran ikatan kovalen atom silikon pada kondisi (a) temperatur nol Kelvin, (b) pada temperatur di atas nol Kelvin

Pada gambar 4.14(a) menunjukkan terbentuknya ikatan kovalen pada atom silikon saat temperatur OK. Jika temperatur dinaikkan maka kristal semikonduktor akan

menerima energi yang menyebabkan putusya ikatan kovalen. Selanjutnya, pasangan elektron-hole akan muncul akibat putusya ikatan kovalen. Pada keadaan ini, elektron dapat bergerak bebas dari keadaan valensi ke keadaan konduksi dan menyebabkan kekosongan yang disebut hole (Gambar 4.14b).

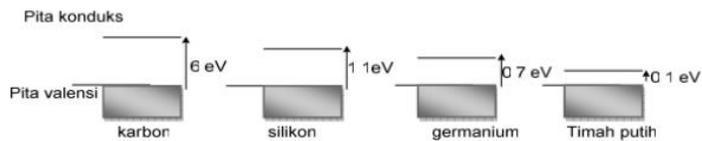
Material semikonduktor dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik. Perbedaanya terletak pada atom pengotor yang menempel pada semikonduktor. Jika semikonduktor intrinsik murni tanpa atom pengotor dan elektron dapat bergerak bebas sebagai elektron konduksi, sedangkan semikonduktor ekstrinsik telah dicampur dengan atom pengotor. Atom pengotor dapat merubah semikonduktor ekstrinsik menjadi tipe-p dan tipe-n. Semikonduktor tipe-p akan terbentuk jika konsentrasi hole lebih banyak dari konsentrasi elektron dan tipe-n akan terbentuk jika konsentrasi elektron yang lebih mendominasi.

Semikonduktor dapat dibedakan pula berdasarkan pergerakan pembawa muatan, terdiri atas 3 tipe, yaitu:

- 1) Eksitasi elektron (semikonduktor instrinsik)

Eksitasi elektron dapat terjadi pada semikonduktor intrinsik yaitu proses melompatnya elektron dari pita valensi ke pita konduksi melewati *bandgap* (celah energi). Beberapa unsur yang bersifat semikonduktor diantaranya adalah karbon (C), silikon (Si), Germanium (Ge) dan timah putih (Sn) yang merupakan golongan IVA (Gambar 4.13). Unsur-unsur dalam satu golongan tersebut memiliki energi gap dan konduktivitas yang

semakin kebawah semakin meningkat (Gambar 4.15). Konduktivitas menunjukkan sifat bahan yang tidak dapat ditimbulkan apabila bahan tidak murni atau telah di sisipi oleh atom lain. Berdasarkan peningkatan konduktivitas tersebut, menunjukkan bahwa unsur-unsur golongan IVA termasuk kedalam semikonduktor intrinsik/murni.



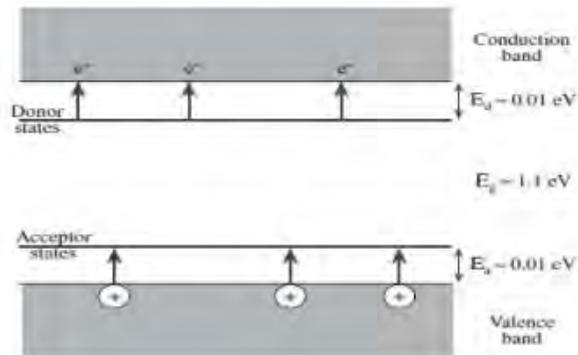
Gambar 4.15. Energi gap dalam golongan IV (skematik) Berdasarkan Gambar 4.15 terlihat bahwa terdapat celah energi antara pita valensi dan pita konduksi.

## 2) Impurity (Semikonduktor ekstrinsik)

Dalam penggunaannya, material semikonduktor ekstrinsik kurang diminati dikarenakan faktor konduktivitas yang sangat bergantung pada temperatur. Perubahan temperatur pada semikonduktor akan mempengaruhi konsentrasi pembawa muatan listrik, sehingga membutuhkan pengotor agar konduktivitasnya relatif konstan.

Pengotoran atau penyisipan atom lain pada suatu semikonduktor biasanya bertujuan untuk meningkatkan konduktivitas semikonduktor. Semikonduktor yang telah diberi pengotor (*dopant*) akan memiliki tingkat energi baru dalam celah energi. Tingkat energi yang ditimbulkan ada dua jenis, yaitu tingkat akseptor dan donor. Untuk tingkat energi akseptor merupakan tingkat energi yang dapat

menerima elektron yang meninggalkan pita valensi dan muncul di atas pita valensi. Sedangkan tingkat energi donor dapat memberikan elektron ke pita konduksi dan terletak di bawah pita konduksi (Gambar 4.16).



Gambar 4.16. Tingkat energi baru (tingkat donor dan akseptor) setelah pemberian *dopant* pada struktur band gap semikonduktor

Bahan yang memiliki ukuran yang sama atau mendekati ukuran sebenarnya dari atom murni yang akan diberi pengotor (*dopant*) dapat memenuhi syarat sebagai atom pengotor. Selain itu, syarat lainnya yang harus dipenuhi adalah jumlah elektron valensi yang berbeda satu dengan elektron valensi atom murni. Jika syarat tersebut terpenuhi, maka bahan sebagai atom pengotor tersebut dapat menempati kisi-kisi pada atom murni dengan tidak merusak susunan kristalnya.

Semikonduktor ekstrinsik dapat dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan jumlah elektron valensi atom pengotor, yaitu semikonduktor tipe-n dan semikonduktor tipe-p.

a) Semikonduktor tipe-n

Semikonduktor tipe-n dapat dibentuk dengan menambah atom pengotor yang memiliki lima elektron valensi yaitu atom dari golongan V. Elektron valensi ini akan menjadi elektron berlebih yang berfungsi sebagai donor, contohnya yaitu SiP, GeAs, ZnO dan yang lainnya.

b) Semikonduktor tipe-p

Semikonduktor tipe-p dapat dibentuk dengan menambahkan atom pengotor yang memiliki tiga elektron valensi dari golongan III sehingga semikonduktor menjadi kekurangan elektron, contohnya yaitu SiB, GeAl dan yang lainnya.

3) Semikonduktor nonstoikiometri

Perbedaan semikonduktor nonstoikiometri dengan semikonduktor ekstrinsik yaitu pengaruh dari cacat yang disebabkan oleh stoikiometri. Cacat yang dihasilkan ini adalah celah pita terlarang yang ditimbulkan antara pita valensi dan pita konduksi. Celah pita terlarang berfungsi sebagai perangkap elektron atau hole. Pada pita konduksi dan pita valensi elektron dan hole semikonduktor nonstoikiometri tereksitasi sebagai akibat reduksi dan oksidasi. Pada semikonduktor nonstoikiometri, elektron dan hole tetap dapat loncat menuju pita konduksi meskipun menerima energi tambahan yang lebih kecil dari energi *gap*/celah energi.

Elektron dan hole yang ada pada semikonduktor dapat mempengaruhi kelistrikan pada bahan tersebut. Berdasarkan jenis arus listrik yang dapat mengalir pada semikonduktor terdapat 2 jenis, yaitu:

1) Arus hanyut (*drift*)

Arus hanyut terjadi ketika semikonduktor berada di medan listrik E, sehingga partikel-partikel bermuatan dalam semikonduktor akan bergerak (hanyut) dengan laju yang berbanding lurus dengan medan listriknya.

2) Arus difusi

Arus difusi akan mengalir dari daerah yang memiliki konsentrasi tinggi ke daerah yang memiliki konsentrasi rendah. Perbedaan konsentrasi pembawa inilah yang menyebabkan terjadinya arus difusi.

### **Rekayasa Material dan Metodenya**

Rekayasa material adalah proses memodifikasi suatu material atau bahan untuk mendapatkan material yang memiliki sifat dan karakteristik yang diinginkan. Modifikasi bisa dilakukan dengan melakukan kombinasi dari beberapa jenis material sehingga memungkinkan untuk menciptakan berbagai jenis produk. Hal ini karena pada dasarnya tidak semua produk bisa diciptakan menggunakan material yang memiliki kualitas dan performa yang sama, seperti misalnya plastik yang digunakan untuk membuat gelas plastik, walaupun tipenya plastiknya sama dengan yang digunakan untuk membuat meja plastik, tetapi akan memiliki performa yang berbeda karena memiliki fungsi yang berbeda juga. Setiap material harus diadaptasi untuk bisa berlaku sesuai dengan fungsinya dalam cara yang terbaik. Hal inilah yang meningkatkan

---

kebutuhan setiap perusahaan untuk melakukan inovasi terhadap produk yang dibuatnya untuk bisa memenangkan persaingan dalam dunia industri.

Ada beberapa jenis dan tujuan dalam rekayasa material yang biasa dilakukan, yaitu :

1. Merekayasa sifat

Umumnya dilakukan untuk meningkatkan atau memodifikasi beberapa sifat dari material agar bisa bekerja sesuai dengan tujuan penggunaan produk. Sifat yang umumnya direkayasa yaitu warna, tekstur, kecerahan, ketahanan oksidasi, konduktivitas listrik dan termal, serta kekerasan.

2. Menghasilkan sifat baru

Rekayasa material dilakukan untuk mendapatkan kemampuan material dengan fungsionalitas yang baru, seperti misalnya material yang mudah dibersihkan, material yang memiliki kemampuan menolak air, material anti biofilm dan sebagainya.

3. Membuat material cerdas

Pada tujuan ini, material yang dibuat dapat bereaksi terhadap stimulus eksternal, seperti temperatur, cahaya, tekanan atau hal lainnya. Material ini dapat berinteraksi dengan lingkungan dengan mengubah beberapa sifatnya seperti warna, ukuran dan lain-lain.

Sementara metode rekayasa material yang dapat dilakukan, yaitu di antaranya :

1. Fungsional coating
2. Additivation
3. Laser mikrostrukturing

4. Roll to roll
5. In mold microstructuring

Pada buku ini, kita hanya akan bahas metode rekayasa material melalui fungsional coating.

### **Rekayasa Material melalui Pelapisan (Fungsional Coating)**

Pelapisan merupakan langkah akhir yang dilakukan dalam proses produksi suatu produk. Umumnya, ada tiga jenis tujuan pelapisan bahan, yaitu memperbaiki sifat permukaan bahan, melindungi permukaan bahan dan mempercantik atau memperindah tampilan bahan. Tujuan yang hendak dicapai saat melakukan pelapisan ini sangat bergantung pada jenis bahan yang hendak dilakukan pelapisan dan tujuan penggunaan produk tersebut.

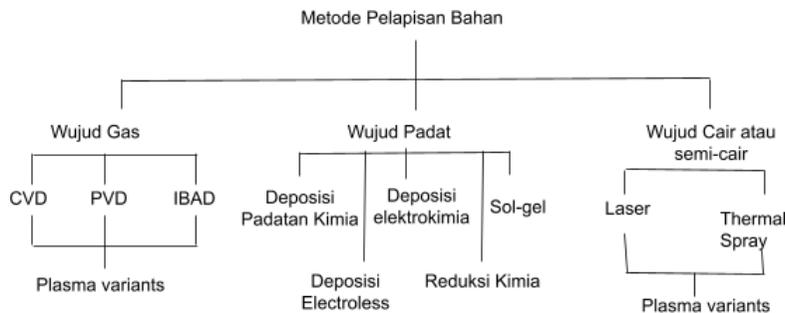
Adanya pelapisan bahan memberikan pengaruh yang sangat luas pada dunia industri, misalnya pelapisan bahan yang dilakukan untuk melindungi dan memperbaiki sifat permukaan bahan (seperti meningkatkan ketahanan korosi, kekerasan, kekuatan, ketahanan panas, konduktivitas termal) dapat meningkatkan durabilitas dari produk tersebut atau meningkatkan lama waktu pemakaiannya, sehingga mengurangi biaya perawatan. Selain itu juga mengurangi emisi dan sampah yang dihasilkan ke lingkungan.

Hampir seluruh bahan dapat dilakukan pelapisan. Namun bahan yang berbeda akan membutuhkan jenis pelapis yang juga berbeda. Berdasarkan material pelapisnya, pelapisan bahan dapat dibagi menjadi tiga jenis, yaitu pelapisan organik, pelapisan inorganik dan pelapisan metalik. Pada pelapisan organik, material yang digunakan sebagai bahan pelapis berasal dari bahan-bahan organik, seperti cat, lacquer dan vernis. Sementara pada pelapisan inorganik bahan pelapis yang digunakan adalah material

---

inorganik, seperti gelas porselain dan enamel. Terakhir pelapisan metalik, bahan pelapisnya berupa logam.

Ada banyak metode yang dapat digunakan untuk melakukan pelapisan, seperti pengecatan, *electroplating*, galvanisasi, *thermal* dan *plasma spray*. Metode-metode tersebut merupakan metode yang sudah lama berkembang dan secara masif digunakan. Sementara metode pelapisan yang lebih baru misalnya adalah *physical and chemical vapor deposition*, *ion implantation*, *ion-assisted deposition*, *ion-beam mixing*, dan *laser treatment*. Klasifikasi metode pelapisan berdasarkan wujud zat pelapisnya ditunjukkan pada gambar 5.



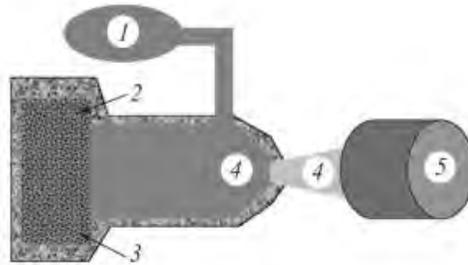
Gambar 4.17. Klasifikasi metode pelapisan bahan (K. Holmberg, A. Matthews)

Metode pelapisan yang dipakai umumnya dipilih dengan mempertimbangkan beberapa faktor, seperti ketahanan korosi yang diperlukan, besar bahan yang akan dilapisi, banyaknya bahan yang akan diproduksi dan faktor lingkungan.

### **Teknologi Thermal Spray untuk Pelapisan**

Thermal Spray bekerja dengan cara menyemprotkan logam cair dalam bentuk butiran-butiran halus ke permukaan material yang hendak dilapisi untuk membentuk suatu lapisan. Pada thermal spray, material pelapis awalnya dalam bentuk batang, kawat atau

serbuk. Material ini kemudian dipanaskan hingga dalam keadaan cair, kemudian disemprotkan ke permukaan bahan yang hendak dilapisi yang sering disebut substrat. Skematik alat thermal spray ditunjukkan pada gambar 4.18.



Keterangan gambar:

1. Material
2. Gas/udara
3. Energi
4. Thermal spray
5. Material yang dilapisi (substrat)

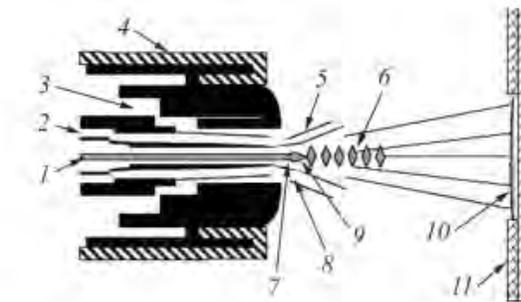
Gambar 4.18. Diagram skematik alat thermal spray

Sifat lapisan dari thermal spray adalah non-fusion, yaitu keadaan dimana material pelapis dan substrat tidak saling menyatu karena berada dalam wujud yang berbeda (tidak mencair bersama). Hampir semua jenis material dapat digunakan sebagai bahan pelapis menggunakan thermal spray selama dapat mencair, mudah dibentuk saat panas dan tidak mudah menguap.

Ada berbagai macam teknologi thermal spray yang dapat digunakan, yaitu flame spray, electric-arc spray, plasma spray, spray and fuse, detonation gun, dan high-velocity oxy-fuel (HVOF) spray. Perbedaan teknik ini didasari pada perbedaan kecepatan partikel, temperatur flame dan atmosfer spray. Diantara teknologi thermal spray tersebut, HVOF merupakan teknologi yang menghasilkan porositas yang rendah, kekuatan yang lebih tinggi,

kekuatan ikatan yang lebih besar dan dekarburisasi yang lebih rendah dibandingkan dengan teknologi thermal spray yang lain.

Teknologi HVOF utamanya digunakan sebagai penghalang korosi dan oksidasi, sehingga dapat meningkatkan waktu hidup material.



Keterangan gambar:

1. Balanced oxyfuel flame
2. combustion zone
3. molten powder particles
4. sprayed material
5. substrate or forming
6. Serbuk dengan gas pembawa nitrogen
7. Oxy-propylene
8. Udara terkompres
9. Kepala gun
10. Air envelope
11. shock diamonds due to supersonic spread of the particles

Gambar 4.19. Diagram skematik HVOF dengan diamond-jet spray gun  
 Pada HVOF, serbuk atau kawat dilelehkan dan didorong pada kecepatan tinggi menuju permukaan dengan menggunakan campuran oksigen dan bahan bakar gas. Propylene, propana, hidrogen, asetilena, metana, etilena, crylena, SPRAL-29 kerosen, MAPP (methyleacetylene-propadiene-stabilized gas), LPG dan lainnya digunakan sebagai bahan bakar pembakaran. Sistem HVOF berisi penyemprot, tempat pemasok serbuk, pengukur aliran, dan pemasok udara dan gas. Pemasok serbuk berisi hopper assembly, air vibrator, feed rate meter dan cabinet control.

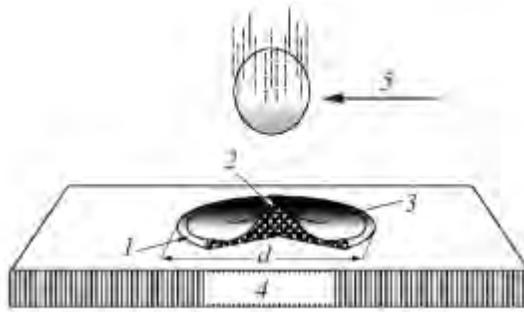
Serbuk pelapis yang ada pada tempat pemasok serbuk dimasukkan ke penyemprot melalui gas pembawa serbuk, di mana pembakaran terjadi. Jumlah serbuk yang dibutuhkan untuk pelapisan diatur dengan menggunakan pengukur laju serbuk. Pada area pembakaran, serbuk dibakar hingga menjadi cair atau setengah cair, tergantung pada suhu leleh dan laju umpan serbuk. Temperatur api untuk proses HVOF ini adalah sekitar 3000°C. Partikel cair atau semi cair tersebut kemudian didorong keluar dari nosel pistol dengan kecepatan yang sangat tinggi menuju target atau substrat, dimana material diendapkan. Partikel serbuk biasanya berukuran 10-63  $\mu\text{m}$  dengan kecepatan 300-800 m/s.

Kualitas coating sangat bergantung pada kecepatan dan temperatur serbuk partikel ketika menubruk permukaan substrat, yang mana berhubungan dengan tekanan gas yang dikembangkan pada ruang pembakaran. Sistem HVOF dirancang untuk menghasilkan semprotan partikel yang memiliki kecepatan tinggi. Hal ini memberi keunggulan bagi HVOF dibandingkan proses thermal spray yang lain, karena :

1. Partikel yang dipanaskan lebih seragam dan efisien karena tingginya turbulensi yang dialami partikel dalam ruang pembakaran
2. Waktu paparan yang lebih pendek karena kecepatan partikel yang tinggi
3. Oksidasi permukaan yang lebih kecil karena waktu paparan yang pendek
4. Mengurangi campuran dengan udara di sekitarnya ketika partikel meninggalkan penyemprot
5. Temperatur partikel yang lebih rendah dibandingkan proses lain

Keadaan partikel yang disemprotkan dari thermal spray bisa dalam bentuk lelehan, semi-lelehan dan juga padat ketika menumbuk substrat. Keadaan partikel ketika meninggalkan area pembakaran ini mempengaruhi mikrostruktur akhir dari coating.

Coating dari HVOF memiliki bentuk lenticular atau lamellar yang dihasilkan dari pemadatan secara cepat butiran-butiran kecil yang mengenai permukaan yang lebih dingin dengan kecepatan tinggi. Ilustrasi partikel coating yang mengenai substrat dan bentuknya ditunjukkan pada gambar 4.20.

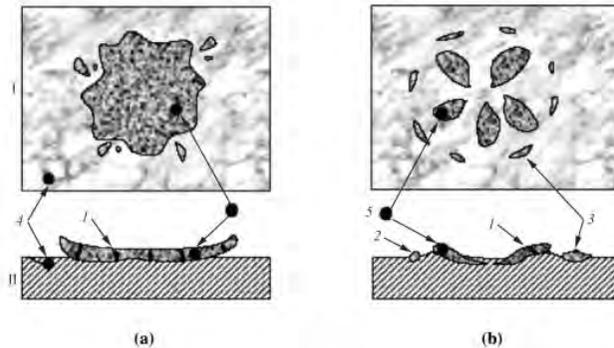


Keterangan gambar :

1. Pinggiran coating
2. Inti
3. Percikakan
4. Substrat
5. Partikel sebelum menubruk substrat

Gambar 4.20. Ilustrasi partikel bulat yang mengenai permukaan rata. Awalnya partikel dilelehkan dan disemprot dalam bentuk bulat. Kemudian pada kontak pertama dengan substrat, tubrukannya menciptakan sebuah gelombang kejut di dalam lamella dan substrat. Pasca tubrukannya membentuk partikel dalam bentuk pancake lamella atau splat (berhubungan dengan kecepatan dan panas partikel yang sedang) seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.21a atau lamella bunga (berhubungan dengan kecepatan dan panas partikel yang tinggi) seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.21b ketika proses pemadatan terjadi. Ketika lelehan droplet

mengenai permukaan dengan kecepatan yang tinggi, proses penyebaran splat ditahan oleh tegangan permukaan, sehingga splat yang ekstrim menjadi lemah dan patah atau membentuk titik bulat kecil.



Keterangan gambar :

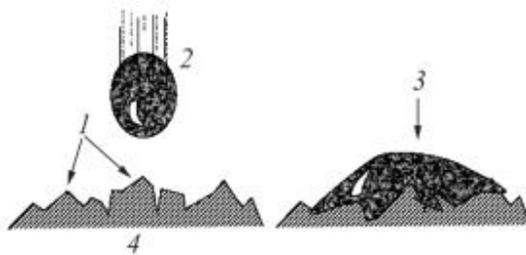
1. Crack
  2. Substrat terdeformasi
  3. Corona
  4. Substrat
  5. Lamella
- I. Tampak atas  
II. Tampang lintang

Gambar 4.21. Dua bentuk morfologi lamella yang memercik ke substrat: a. pancake, b. bunga

### Sifat Fisik dan Mekanik dari Coating menggunakan HVOF

1. Mikrostruktur dari coating menggunakan HVOF menunjukkan karakteristik morfologi lapisan yang seperti splat karena deposisi dan pepadatan kembali dari lelehan atau semi lelehan partikel serbuk. Selama penyemprotan, partikel serbuk umumnya berisi tiga zona terpisah, yaitu daerah yang sepenuhnya meleleh, setengah meleleh dan tidak meleleh. Proporsi dari daerah ini bergantung pada ukuran partikel, lintasan gerak dari penyemprot, dinamika gas (kecepatan/ temperatur) dari thermal spray dan jenis penyemprot.

2. Sifat Korosi dari Coating : Coating yang dihasilkan dari HVOF sangat padat dan minim porositas, sehingga memiliki ketahanan korosi yang lebih tinggi dibandingkan coating dari thermal spray yang lain
3. Adhesi dari coating : Coating HVOF memiliki kekuatan ikatan yang lebih tinggi dibandingkan coating dari thermal spray yang lain karena tingginya energi kinetik partikel saat menumbuk substrat. Kuatnya adhesi dari partikel coating terhadap substrat ini bergantung pada mekanisme mekanik dan metalurgi-kimia. Partikel yang menabrak substrat akan menjadi rata dan mengisi permukaan substrat dan kemudian secara mekanis mengunci dirinya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.22. Selanjutnya, difusi atau paduan mungkin terjadi yang menyebabkan pembentukan senyawa intermetalik. Inilah yang dimaksud dengan mekanisme adhesi metalurgi-kimia.



Keterangan gambar :

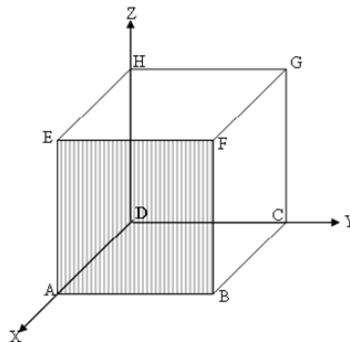
1. Kekasaran
2. Partikel
3. Partikel secara mekanis terkunci dalam kekasaran substrat
4. Substrat

Gambar 4.22. Diagram skematik adhesi dari partikel terhadap substrat kasar

Kekuatan ikatan tidak hanya bergantung pada proses deposisi, tetapi juga pada kemurnian (tidak adanya oksida dan unsur lain), kekasaran yang memadai dan adhesi terhadap permukaan substrat paralel dengan deformasi plastis yang ditampilkan partikel pada permukaan substrat. Kekuatan kohesif bergantung pada kekasaran, perbedaan temperatur dan kekuatan ikatan dari permukaan yang dilapisi sebelumnya.

### Soal

1. Sebutkan dan gambarkan bentuk-bentuk dari kisi bravais kubik!
2. Apa yang membedakan kristal dan amorf?
3. Tentukan indeks miller bidang AFBE berikut!



4. Jelaskan dan gambarkan ikatan-ikatan yang dapat terjadi pada kristal!
5. Jelaskan terjadinya struktur pita energi dalam kristal dan arti fisis struktur pita tersebut!
6. Jelaskan sifat listrik logam dan nonlogam dari struktur pita energinya!
7. Sebuah kristal satu dimensi memiliki energi potensial sebesar  $U(x) = 2\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)$  eV, dimana  $a$  adalah konstanta kisi.

- Tentukanlah nilai ke dua rapat peluang dititik  $x = a/2$  dan tentukan pula celah energi kristal tersebut.
8. Energi potensial sebuah elektron konduksi disuatu titik  $X$  dalam sebuah kristal satu dimensi dinyatakan oleh  $U(x) = 4\cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)$  eV, dimana  $a$  menyatakan konstanta kisi. Berapakah nilai celah energi kisi dan nilai celah energi kristal tersebut.
  9. Jelaskan mengapa material perlu di rekayasa?
  10. Bagaimana cara memilih metode pelapisan yang tepat?



# BAB 5

## DESAIN BATERAI AKI

### **Kompetensi Dasar**

Menelaah dan menerapkan pengetahuan mahasiswa dengan cakupan pengetahuan faktual, konseptual, prosedural, dan metakognitif pada materi kelistrikan dan elektrokimia.

### **Tujuan Pembelajaran**

Melalui pembahasan materi ini, diharapkan mahasiswa dapat:

1. Mengetahui konsep dan prinsip dasar elektrokimia
2. Mengetahui konsep dan prinsip elektrodinamika dalam fisika
3. Mengetahui hubungan antara elektrokimia dan elektrodinamika dan penerapannya dalam desain baterai aki.

### **Pendahuluan**

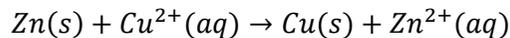
Kendaraan bermotor saat ini sudah menjadi kebutuhan vital bagi masyarakat untuk pergi dari satu tempat ke tempat lainnya. Salah satu komponen penting adalah aki yang menjadi sumber listrik pada sistem kelistrikan kendaraan bermotor. Tapi tahukah kamu bahwa sistem aki dapat kita kaji secara kimia dan fisika?

Secara kimia, aki dapat menghasilkan listrik dengan memanfaatkan suatu reaksi kimia yang disebut elektrokimia. Dimana dengan memanfaatkan dua jenis logam tertentu dan suatu larutan elektrolit, listrik dapat muncul. Kita juga dapat mengkaji sistem kelistrikan ini secara fisika, dimana aliran listrik ke seluruh komponen dapat kita pelajari. Pada bahasan kali ini, kita akan

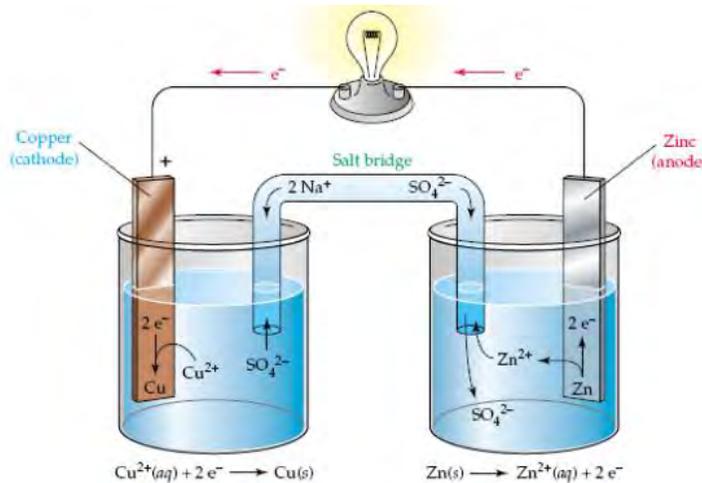
melakukan kajian pada teori-teori yang dipakai, prinsip kerja, dan desain yang digunakan untuk baterai aki.

### Elektrokimia

Reaksi redoks dapat terjadi ketika transfer elektron dari zat pereduksi (yang mengalami oksidasi) dengan melepaskan sejumlah elektron yang kemudian ditangkap dan dipakai oleh zat pengoksidasi sehingga reaksi reduksi terjadi. Contohnya, jika terdapat logam Zn yang dicelupkan ke dalam larutan  $\text{CuSO}_4$ , maka logam Zn akan melepaskan elektron karena mengalami oksidasi dan menyebabkan terjadinya transfer elektron. Kemudian, elektron digunakan oleh ion  $\text{Cu}^{2+}$  yang tereduksi menjadi logam.



Elektron yang ditransfer dalam reaksi redoks dapat diubah menjadi energi listrik jika posisi reduktor dan oksidator berada di dalam wadah yang terpisah serta dihubungkan dengan rangkaian kawat (connector) yang dimanfaatkan sebagai media aliran elektron yang dilepaskan suatu reduktor untuk menghasilkan energi listrik.



Gambar 5.1. Sel Volta Elektroda Zn dan Cu dengan larutan  $\text{ZnSO}_4$  dan  $\text{CuSO}_4$

Logam Zn (Seng) dan Logam Cu (Tembaga) sebagai tempat terjadinya reaksi redoks disebut elektroda. Elektroda logam Zn teroksidasi dan melepas elektron, yang kemudian mengalir melalui connector yang dapat diuji menggunakan sebuah lampu yang terhubung dalam rangkaian (dapat pula menggunakan voltmeter). Kemudian, elektron sampai di elektroda logam Cu yang dimanfaatkan untuk mereduksi ion  $\text{Cu}^{2+}$  menjadi Cu. Elektroda terjadinya reaksi oksidasi disebut Anoda, sedangkan elektroda terjadinya reaksi reduksi disebut katoda. Karena elektron (bermuatan negative) mengalir dari anoda ke katoda, maka anoda adalah elektroda negative dan katoda adalah elektroda positif.

Arus listrik yang mengalir dari anoda ke katoda, dapat dituliskan dalam bentuk diagram sel:



Dalam bentuk umum, sel volta dituliskan dalam bentuk diagram sel seperti berikut ini:

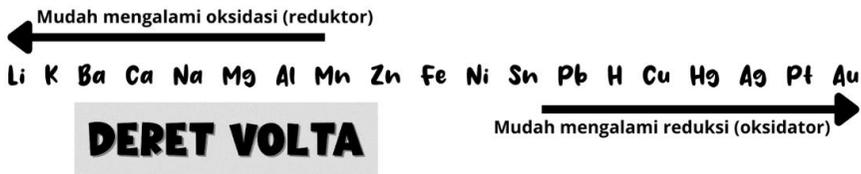


Aliran arus listrik dari anoda ke katoda terjadi akibat adanya perbedaan energi potensial antara kedua elektroda.

Namun, ternyata tidak semua logam dapat mereduksi logam lain sehingga reaksi redoks tidak terjadi dan tidak mungkin menghasilkan arus listrik. Contohnya, jika logam Zn pada skema sebelumnya diganti dengan logam Ag (perak) yang membentuk pasangan elektroda (Cu dan Ag) dan pasangan larutan ( $\text{CuSO}_4$  dan  $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ), maka reaksi redoks tidak dapat berlangsung dan tidak dapat menghasilkan arus listrik.



Karena hal tersebut, maka disusunlah deretan logam berdasarkan kekuatan reduktor suatu logam menggunakan data eksperimen yang disebut deret volta. Deret volta ini disusun mulai dari reduktor paling kuat (mudah teroksidasi) hingga yang terlemah (sulit teroksidasi atau bersifat mulia).



Gambar 5.2. Deret Volta

### Arus Listrik

Arus listrik merupakan aliran muatan listrik. Arus listrik dipakai untuk menentukan ukuran banyaknya muatan listrik yang mengalir dalam satuan waktu. Jika terdapat sejumlah muatan listrik  $\Delta Q$  yang mengalir dalam selang waktu  $\Delta t$ , maka arus listrik didefinisikan sebagai:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (5.1)$$

Dimana:

$I$  = Arus listrik (A)

$\Delta Q$  = Muatan listrik (C)

$\Delta t$  = Waktu (s)

Dengan demikian 1 ampere = 1 coulomb/detik

Arah arus listrik akan searah dengan arah aliran muatan positif. Sebenarnya, pada logam, yang mengalir merupakan elektron yang bermuatan negatif. Muatan positif diartikan sebagai tidak mengalirnya atom yang ditinggalkan elektron karena terikat kuat

mengisi logam tersebut. Selain itu, arus listrik mengalir searah dengan aliran muatan positif, sehingga arah aliran arus listrik pada logam berlawanan dengan arah aliran elektron.

Muatan listrik mengalir dari suatu lokasi ke lokasi lainnya disebabkan oleh adanya beda potensial, dimana yang memiliki potensial lebih tinggi akan melepaskan muatan ke potensial yang lebih rendah. Arus yang mengalir akan berbanding lurus dengan beda potensial ( $V$ ). Sehingga aliran arus dapat diformulasikan sebagai:

$$I = \frac{1}{R}V \quad (5.2)$$

Dimana:

$R$  = Hambatan listrik antara dua titik ( $\Omega$ ) / ohm

$V$  = Beda Potensial ( $V$ )

Hambatan listrik berperan untuk menghambat aliran muatan listrik. Jika nilai  $R$  makin besar, maka makin sulit pula arus listrik yang mengalir (nilai arus makin kecil).

Titik potensial listrik yang berbeda dalam suatu rangkaian akan terjadi jika pada rangkaian terpasang sumber potensial listrik yang disebut dengan GGL (Gaya Gerak Listrik). Terdapat dua kutub atau terminal pada GGL yang memiliki potensial yang berbeda. Jika terminal atau kutub tadi dihubungkan pada rangkaian, arus listrik akan mengalir keluar dari kutub yang berpotensi lebih tinggi menuju ke tingkat potensial yang lebih rendah. Potensial tinggi pada kutub GGL dinamakan kutub positif, dan yang lebih rendah dinamakan kutub negative.

---

## Hambatan Listrik

Semua material (batu, besi, kayu, karet, dll) mempunyai resistansi terhadap listrik. Namun, resistansi (hambatan) listrik yang dimiliki batu, kayu, karet, dll sangat besar sehingga ketika diberi beda potensial pada ujung-ujungnya, kemungkinan hampir tidak akan ada arus yang mengalir. Benda yang tidak dapat dialiri arus listrik disebut dengan isolator. Sebaliknya, jenis logam mempunyai hambatan yang kecil. Jika terdapat sedikit beda potensial saja, maka arus yang mengalir cukup besar. Material yang dapat dialiri arus listrik dinamakan konduktor.

Hambatan listrik, memiliki sifat sebagai berikut:

- Jika bahan makin panjang, maka resistansi akan makin besar ( $R \propto L$ )
- Jika ukuran penampang makin besar, maka resistansi akan makin kecil ( $R \propto 1/A$ ).

Hubungan antara hambatan listrik yang dimiliki bahan dengan ukuran bahan memenuhi:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (5.3)$$

Dengan,

$R$  adalah hambatan yang dimiliki bahan

$L$  adalah panjang bahan,

$A$  adalah luas penampang bahan

$\rho$  adalah hambatan jenis bahan.

Hambatan yang dimiliki oleh suatu material berubah seiring dengan terjadinya perubahan temperature. Secara umum,

---

hambatan yang makin tinggi akan berbanding lurus dengan nilai temperature. Pada logam, formulasi suhu dan hambatan memenuhi persamaan:

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (5.4)$$

Dimana,

$T$  adalah suhu,

$T_0$  adalah suhu acuan,

$R$  adalah besarnya hambatan pada suhu  $T$ ,

$R_0$  adalah besarnya hambatan pada suhu  $T_0$ ,

$\alpha$  adalah koefisien suhu dari hambatan  $(^{\circ}C)^{-1}$ .

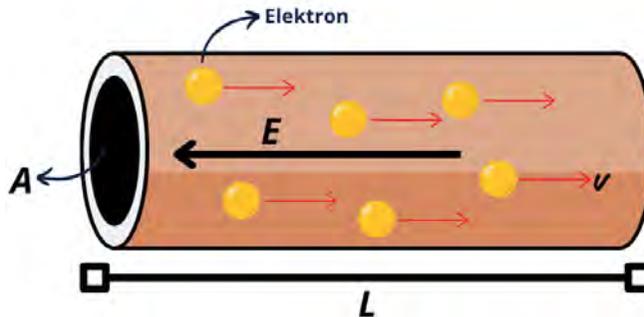
Suatu sumber tegangan seperti baterai dan aki juga memiliki hambatan. Bukan hanya hambatan-hambatan yang dipasang, namun juga hambatan yang dimiliki suatu sumber tegangan. Hambatan pada sumber tegangan tersebut dinamakan hambatan internal. Sumber tegangan yang paling baik adalah sumber tegangan yang memiliki nilai hambatan yang sangat kecil.

### **Konduktivitas Listrik**

Gambar ilustrasi suatu konduktor dapat dilihat pada Gambar 5.3. Pada suatu kawat konduktor, terdapat sejumlah elektron yang mampu bergerak dengan bebas. Jika tidak terdapat perbedaan potensial antara kedua titik pada ujung kawat, maka aliran elektron ke kiri atau ke kanan tidak terjadi sehingga total arus yang mengalir pada kawat sama dengan nol. Apabila terdapat beda potensial di antara dua titik pada ujung kawat, maka medan listrik akan muncul yang akan membuat elektron-elektron tadi bergerak

---

dengan arah yang berlawanan dengan arah medan (percepatan dalam arah yang berlawanan dengan arah medan).



Gambar 5.3. Kawat konduktor yang dialiri listrik  
Ketika pengukuran dilakukan, didapatkan bahwa kecepatan elektron dalam konduktor akan berbanding lurus dengan kuat medan di dalam bahan, yang jika diformulasikan menjadi:

$$v = \mu E \quad (5.5)$$

Dimana,  $\mu$  merupakan konstanta atau mobilitas elektron.

### Daya Listrik

Jika terdapat arus listrik yang mengalir pada suatu hambatan, maka hambatan tersebut akan mengalami kenaikan suhu. Hal ini membuktikan bahwa adanya konversi energi listrik menjadi energi panas pada hambatan tersebut. Pertanyaannya, berapa energi listrik yang diubah menjadi panas per detik? Atau berapakan daya listrik yang diubah menjadi panas per detik pada suatu hambatan?

Jika kita tinjau arus yang mengalir melewati suatu hambatan pada selama suatu selang waktu  $\Delta t$ . Besarnya muatan yang mengalir adalah

$$\Delta q = I \cdot \Delta t \quad (5.6)$$

Aliran arus listrik berasal dari satu ujung hambatan menuju ujung hambatan lain yang mempunyai beda potensial sebesar  $V$ . Sehingga, ketika muatan bergerak dari satu ujung ke ujung hambatan lainnya, muatan tersebut mendapatkan tambahan energi sebesar

$$\Delta U = \Delta q \cdot V \quad (5.7)$$

Saat mencapai ujung kedua hambatan, kecepatan muatan akan bertambah sehingga arus di ujung kedua muatan juga akan semakin besar. Tetapi, dalam rangkaian besar arus di ujung awal maupun ujung akhir hambatan sama. Ini berarti tambahan energi yang didapat muatan dibuang dalam bentuk panas sehingga energi kinetik muatan tidak berubah. Jadi, jumlah energi yang diubah menjadi panas adalah

$$\Delta Q = \Delta q \cdot V \quad (5.8)$$

$$\Delta Q = I \cdot \Delta t \cdot V$$

Sehingga, daya yang dibuat pada hambatan menjadi

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (5.9)$$

$$P = I \cdot V$$

Menggunakan hukum ohm, kita dapatkan formulasinya menjadi

$$P = I^2 R \quad (5.10)$$

## **STEM**

### **Aki**

Aki merupakan perangkat elektrokimia yang dimanfaatkan untuk suplai listrik ke berbagai sistem kelistrikan, mulai dari sistem starter mesin, pengapian, lampu, dan komponen listrik lainnya. Alat ini mampu menyimpan listrik dalam bentuk energi kimia yang dapat disalurkan/disuplai (apabila diperlukan) ke berbagai sistem kelistrikan. Dalam prosesnya, aki akan kehilangan energi kimia, sehingga alternator akan melakukan pengisian energi kembali ke dalam aki. Siklus pengisian dan pengeluaran ini terjadi terus-menerus dan berulang-ulang.

Pada perangkat aki, terdapat asam sulfat sebagai elektrolit, elektroda positif, dan elektroda negative dalam bentuk plat-plat yang terbuat dari timah (disebut dengan aki timah). Bagian dalamnya terbagi menjadi beberapa sel untuk aki generator, yang masing-masing sel terdapat beberapa elemen yang terendam dalam elektrolit.

Aki ditemukan pada tahun 1859, oleh seorang ahli bernama Gaston Plante. Hingga saat ini, terdapat 3 jenis aki yang sering digunakan, yaitu aki basah, aki hybrid, dan aki kering. Aki basah seringkali digunakan pada kendaraan mobil dan motor (karena cenderung relative lebih murah), yang dicirikan dengan adanya lubang-lubang untuk tempat mengisi air. Kelemahan aki jenis ini ialah memiliki tingkat penguapan yang lebih tinggi, sehingga harus sering rutin melakukan pemeriksaan ketinggian permukaan air. Aki hybrid memiliki kemiripan dengan aki basah, namun menggunakan material sel-sel yang lebih baik dibandingkan dengan aki basah, serta didesain dengan menambahkan lapisan anti penguapan. Sehingga, perawatan aki hybrid lebih mudah

---

dibandingkan dengan aki basah konvensional. Aki kering, disebut seperti itu karena tidak terdapat lubang pengisian air. Namun, bukan berarti tidak terdapat air/cairan, hanya saja menggunakan gel-gel di dalamnya. Keunggulan aki ini adalah karena memiliki tingkat penguapan yang sangat rendah, sehingga tidak terlalu memerlukan perawatan. Aki kering memiliki dibanderol dengan lebih mahal dibandingkan kedua jenis aki lainnya.

Storage battery atau aki adalah suatu sel (elemen sekunder) dan merupakan suatu sumber arus listrik searah yang mampu mengonversi energi kimia menjadi energi listrik. Aki termasuk elemen elektrokimia yang dapat mempengaruhi zat pereaksinya, sehingga disebut elemen sekunder. Kutub positif pada aki memakai lempeng oksida dan kutub negative aki memakai lempeng timbal, serta larutan elektrolitnya menggunakan larutan asam sulfat.

Saat digunakan, reaksi kimia akan terjadi kemudian akan terbentuk endapan pada anoda (reduksi) dan katoda (oksidasi). Sehingga, nantinya antara anoda dan katoda tidak terdapat beda potensial, artinya aki yang kita miliki telah kosong. Agar dapat dipakai kembali, harus dilakukan pengisian pada aki dengan cara mengalirkan suatu arus listrik dengan arah yang berlawanan dengan arus listrik yang dikeluarkan oleh aki tersebut yang menyebabkan terjadinya pengumpulan muatan listrik. Jumlah muatan listrik yang terkumpul dan dinyatakan dalam ampere jam, disebut tenaga aki. Pada keadaan real, saat dipakai, seluruh energi yang tersimpan pada aki tidak akan dikeluarkan sepenuhnya. Oleh karena itu, terdapat efisiensi pada aki.

Pada mobil berteknologi lama, aki yang sering digunakan adalah aki berjenis basah (lead-acid). Komponen aki ini merupakan gabungan dari beberapa lempeng Pb (Timbal) dan lempeng PbO<sub>2</sub>

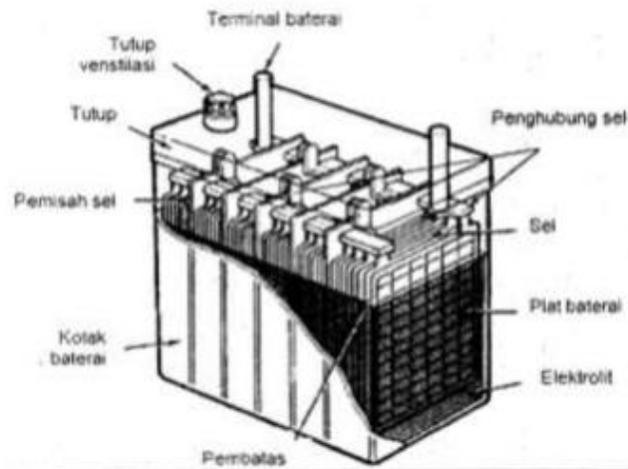
---

(oksida), yang direndam pada suatu larutan elektrolit dengan komposisi 65% H<sub>2</sub>O (air) dan 35% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (asam sulfat). Aki jenis ini memiliki tegangan keluaran sebesar 12 Volt yang didapat dengan cara menghubungkan enam buah sel galvanic. Jika aki tidak bisa menyimpan arus listrik lagi, berarti aki sudah mulai soak (rusak). Bila disusun secara seri, setiap sel mampu menghasilkan 2,1 volt. Jadi, apabila diisi hingga penuh, akan menghasilkan  $2,1 \text{ volt} \times 6 \text{ sel} = 12,6 \text{ volt}$ .

Pada saat pengisian (charge), cairan elektrolit akan bereaksi dengan material pada lempeng yang merubah permukaan lempeng tersebut menjadi lead sulphate. Saat digunakan (discharge), maka akan terjadi reaksi sebaliknya, yaitu lead sulphate akan berubah kembali ke bentuk semula menjadi lead oxide dan lead. Jika kendaraan digunakan, siklus proses ini akan berulang. Namun, proses ini tidak sempurna karena terdapat deposit yang terbentuk yang lama kelamaan akan makin tebal dan mengurangi performa kinerjanya. Pada suatu ketebalan tertentu, deposit yang terbentuk ini akan membuat aki tidak akan bisa dilakukan pengisian ulang kembali, dan harus dilakukan penggantian.

### **Desain Konstruksi Aki**

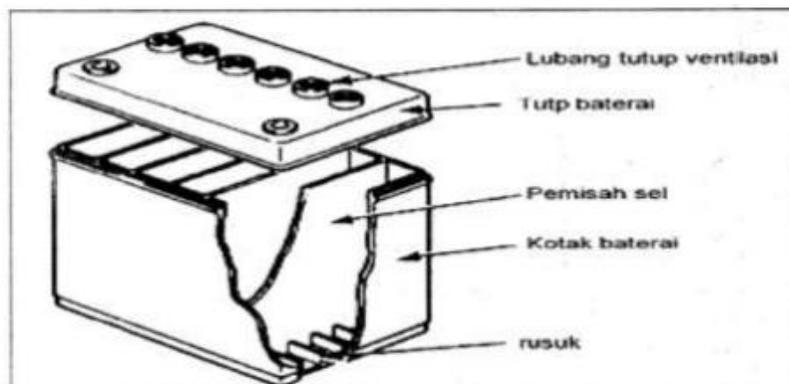
Skema desain konstruksi aki dapat dilihat pada Gambar 5.4. Penjelasan dari tiap bagian adalah sebagai berikut:



Gambar 5.4. Desain Baterai Aki

### 1. Kotak Aki

Kotak aki memiliki fungsi untuk menampung dan melindungi seluruh komponen aki di dalamnya, serta memberi ruang bagi endapan aki di bagian bawah. Kotak aki biasanya dibuat transparan agar mudah mengontrol ketinggian larutan elektrolit pada aki.



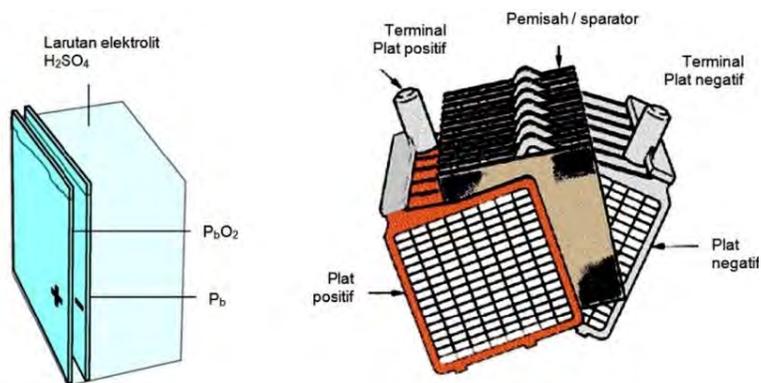
Gambar 5.5. Desain Kotak Aki

## 2. Penutup Aki

Digunakan untuk menutup aki bagian atas, tempat kedudukan terminal, lubang ventilasi, dan untuk pengecekan larutan elektrolit atau penambah air.

## 3. Plat Aki

Plat positif dan negative memiliki suatu grid yang terbuat dari antimony dan suatu paduan timah. Plat positif terbuat dari lapisan aktif oksida timah (lead dioxide,  $PbO_2$ ) dan plat negative terbuat dari sponge lead ( $Pb$ ). Ukuran serta jumlah plat yang dimiliki oleh aki mempengaruhi kemampuan aki untuk mengalirkan arus.

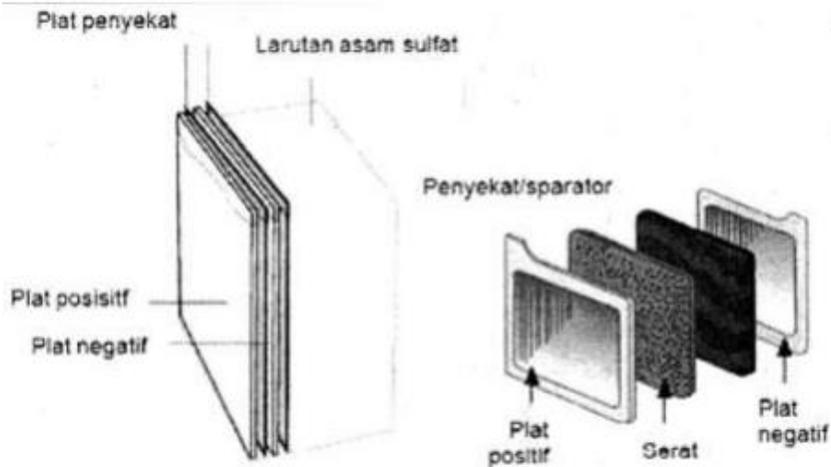


Gambar 5.6 Desain Plat pada Aki

Macam-macam bahan yang sering digunakan yaitu antimony timah (lead antimony), kalsium timah (lead calcium), dan rekombinasi (gel cell). Jenis plat dan elektrolit yang dipakai pun dapat mempengaruhi karakteristik aki yang dihasilkan.

## 4. Separator (penyekat)

Suatu penyekat yang memiliki pori ditempatkan di antara plat positif dan negative. Pori tersebut memungkinkan larutan elektrolit melewatinya yang juga berfungsi mencegah korslet (hubungan singkat) antar plat.

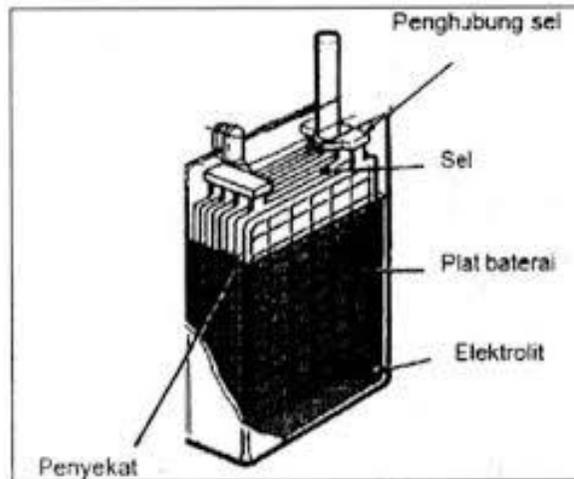


Gambar 5.7 Desain Peletakan plat dengan penyekat

Apabila terjadi hubungan singkat karena kerusakan separator, maka akan terjadi kebocoran energi yang dihasilkan. Separator terbuat dari bahan resi fiber yang diperkuat, karet, atau plastik. Permukaan separator yang berpori menghadap ke plat positif untuk melindungi karat dan plat positif agar tidak berhamburan. Bahan separator bukanlah konduktor, cukup kuat, tidak mudah berkarat karena elektrolit, dan tidak berbahaya bagi elektroda.

## 5. Sel

Satu unit plat positif dan plat negative yang dibatasi oleh penyekat di antaranya disebut dengan sel atau elemen. Sel-sel ini dihubungkan secara seri, sehingga jumlah sel pada aki akan mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan. Satu buah sel dapat menghasilkan tegangan sebesar 2,1volt, sehingga aki 12volt memiliki 6 sel.



Gambar 5.8 Desain sel pada aki

#### 6. Penghubung Sel

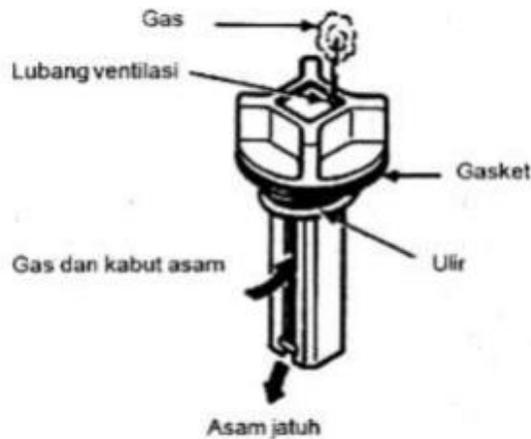
Penghubung sel yang dipakai adalah suatu plat logam yang dihubungkan dengan plat-plat. Tiap sel, terdapat dua buah penghubung (untuk plat positif dan negative) yang disambung secara seri untuk semua sel.

#### 7. Terminal Aki

Terdapat dua terminal pada aki, yaitu positif dan negative yang terdapat pada bagian atas aki. Saat terpasang, terminal-terminal ini dihubungkan dengan kabel besar (positif) dan kabel massa (negative).

#### 8. Tutup Ventilasi

Komponen ini terdapat pada aki basah yang digunakan untuk menambah atau memeriksa air pada aki. Lubang ventilasi ini berfungsi agar gas hydrogen bisa keluar yang dihasilkan saat proses pengisian.



Gambar 5.9 Desain lubang dan penutup aki

#### 9. Larutan Elektrolit

Larutan elektrolit merupakan cairan yang berada di bagian dalam aki, dan berasal dari campuran antara asam sulfat ( $H_2SO_4$ ) dan air ( $H_2O$ ). Secara kimia, campuran tersebut nantinya akan bereaksi dengan bahan aktif pada plat aki untuk menghasilkan listrik. Saat terisi penuh, elektrolit biasanya memiliki kadar 64% air dan 36% asam sulfat, serta memiliki berat jenis 1,270 pada suhu  $20^\circ C$ . Berat jenis adalah perbandingan antara massa cairan dan massa air pada volume yang sama. Jika berat jenis makin tinggi, maka makin kental pula zat cair tersebut. Berat jenis yang dimiliki air adalah 1 dan berat jenis asam sulfat adalah 1,835.



Gambar 5.10 Skema perbandingan larutan elektrolit pada aki

### **Prinsip Kerja Aki**

Aki merupakan suatu proses elektrokimia, dimana saat pengisian terjadi konversi energi listrik menjadi energi kimia, dan saat pengeluaran terjadi konversi energi kimia menjadi energi listrik. Aki pada kendaraan terdiri atas sejumlah sel yang tiap selnya memiliki tegangan sebesar 2V, yang berarti aki kendaraan bertegangan 12 V terdiri atas 6 sel yang disusun secara seri.

Di bagian dalam aki, antara satu sel dan sel lainnya dipisahkan oleh suatu penyekat yang memisahkan tiap ruang pada sel, sehingga cairan elektrolit pada sel juga tidak berhubungan. Di dalam satu sel terdapat pelat-pelat yang tersusun atas kutub positif dan kutub negative (yang antar pelat dipisahkan oleh kayu atau plastic). Bahan aktif pada plat positif terbuat dari bahan oksida timah ( $PbO_2$ ), sedangkan plat negative berbahan timah berpori (Pb). Pelat-pelat tadi direndam dalam suatu cairan elektrolit asam sulfat ( $H_2SO_4$ ). Aki adalah kombinasi dua atau lebih sel elektrokimia yang mampu menyimpan energi dan mengonversinya menjadi energi listrik. Aki sekali pakai disebut aki primer, dan aki isi ulang disebut juga dengan aki sekunder.

**Proses Mengalirkan Arus**

1. Senyawa oksigen pada plat positif terlepas karena bereaksi dengan senyawa hydrogen pada cairan elektrolit yang membentuk air ( $H_2O$ ).
2. Asam ( $SO_4$ ) pada cairan elektrolit bereaksi dengan timah (Pb) di kedua pelat positif dan negative dan menempel pada plat tersebut. Reaksi ini berlangsung terus menerus hingga tenaga aki habis (dalam keadaan discharge).

Saat aki dalam keadaan discharge seperti ini, maka hampir seluruh asam melekat pada pelat di dalam sel hingga konsentrasi pada cairan elektrolit akan sangat rendah dan hanya terdiri atas air. Akibatnya, berat jenisnya menurun menjadi sekitar  $1,1 \text{ kg/dm}^3$  dan mendekati berat jenis air  $1 \text{ kg/dm}^3$ . Perlu diketahui bahwa aki penuh memiliki berat jenis sekitar  $1,285 \text{ kg/dm}^3$ . Sehingga, penuh atau berkurangnya kapasitas aki dapat kita cek dengan perbedaan berat jenis ini menggunakan hydrometer.

**Proses Menerima Arus**

Aki dapat menerima arus saat sedang disetrum atau dialiri dengan listrik DC, dimana kutub positif pada aki dihubungkan dengan arus listrik positif dan kutub negative dihubungkan dengan arus listrik negative. Tegangan yang dialirkan ke dalam aki biasanya adalah sebesar tegangan total yang dimiliki oleh aki (aki 12 V dialiri oleh tegangan 12 V pula). Jumlah kuat arus yang mesti dialirkan juga dipengaruhi oleh kapasitas yang dimiliki aki tersebut. Dengan kata lain, proses pengisian (penerimaan arus) berlawanan dengan proses pengeluaran arus.

1. Senyawa oksigen di dalam air ( $H_2O$ ) terlepas setelah bereaksi dengan timah (Pb) pada plat positif dan kembali secara perlahan menjadi oksida timah ( $PbO_2$ ).
-

2. Zat asam ( $\text{SO}_4$ ) yang menempel pada plat positif dan negative akan terlepas dan bergabung dengan hydrogen pada air ( $\text{H}_2\text{O}$ ) di dalam larutan elektrolit dan kembali membentuk asam sulfat ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Sehingga, berat jenisnya akan bertambah pula saat penuh.

### **Cairan Elektrolit**

Plat-plat aki harus dalam keadaan terendam di dalam cairan elektrolit sekitar 4-10 mm di atas bagaian tertinggi pada pelat. Bila terdapat bagian plat yang tidak terendam oleh elektrolit, akibatnya bagian tersebut akan terkontaminasi dengan udara yang membuat bagian tersebut akan rusak. Sebagai contoh, sulfat mungkin tidak akan lagi bisa menempel pada bagian tersebut sehingga akan ditemukan konsentrasi sulfat yang sangat tinggi pada ruang sel.

Pengecekan secara berkala terhadap cairan elektrolit pada aki setidaknya harus dilakukan sebulan sekali agar kita bisa mengontrol ketinggian cairan elektrolit karena penguapan akibat panas yang terjadi pada proses pengisian energi. Cairan elektrolit yang terlalu penuh juga tidak baik bagi aki, karena bisa jadi akan terdapat cairan elektrolit yang tumpah melalui lubang-lubang sel yang dapat mengakibatkan beberapa komponen mengalami korosi.

### **Kapasitas Aki**

Kapasitas aki merupakan jumlah ampere jam ( $\text{Ah} = \text{Ampere} \times \text{waktu}$ ), artinya rata-rata jumlah energi yang mampu disalurkan oleh aki sebelum tiap selnya menyentuh voltase turun (drop voltage) yaitu kira-kira sebesar 1,75 V (Karena tiap sel memiliki tegangan sebesar 2V dan akan terus turun saat dipakai; kapasitas efektif dikatakan sudah terpakai seluruhnya saat tegangan sel menyentuh 1,75 V). Sebagai contoh, aki 12 V 75 Ah mampu mengalirkan kuat arus sebesar 75 ampere dalam waktu satu jam

---

yang berarti mampu memberikan daya rata-rata sebesar 900 watt. Sehingga, aki tersebut berarti dapat meyuplai sebuah alat/mesin berdaya 900 watt dalam waktu satu jam atau alat berdaya 90 watt selama 10 jam. Beberapa factor yang mempengaruhi besarnya kapasitas aki adalah:

1. Jumlah bahan aktif

Jika ukuran pelat yang berinteraksi dengan elektrolit, maka kapasitas suatu aki juga akan makin besar. Selain itu, makin banyak pelat yang bersentuhan dengan elektrolit juga akan membuat kapasitas aki makin besar. Sehingga, kapasitas yang besar didapatkan dari memperluas dan memperbanyak plat pada aki yang terendam oleh suatu cairan elektrolit. Kuncinya, plat tadi harus terendam elektrolit, karena jika tidak, maka plat tadi tidak akan berfungsi untuk meningkatkan kapasitas aki.

2. Temperatur

Jika temperature makin rendah, maka kapasitas aki saat digunakan akan makin rendah pula karena reaksi kimia yang terjadi pada suhu rendah akan makin lambat (walaupun arus yang digunakan tinggi/rendah).

3. Waktu dan arus pengeluaran

Jika energi yang dikeluarkan oleh aki lambat (arus yang dikeluarkan rendah), maka waktu pengeluaran juga akan makin panjang dan kapasitas juga makin tinggi. Secara umum, kapasitas aki yang digunakan pada pengeluaran tertentu biasanya 20 jam.

**Soal**

1. Jika di dalam suatu sistem kelistrikan kendaraan bermotor, dibutuhkan suatu listrik masukan dengan tegangan sumber sebesar 12 V.
  - a. Apakah memungkinkan untuk menggunakan baterai biasa? Jika tidak, mengapa baterai aki digunakan dalam sistem kelistrikan kendaraan bermotor?
  - b. Dapatkan kamu mendeskripsikan bagaimana mekanisme pengaliran arus listrik pada aki yang dihasilkan melalui proses elektrokimia?
  - c. Jika sistem kelistrikan menggunakan sebuah hambatan berupa kawat besi dengan panjang sekitar 100 cm dan luas sekitar  $1,3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ . Berapakah besarnya hambatan Jika hambatan jenis kawat besi tersebut  $9,7 \times 10^{-8} \text{ Ohmmeter}$ ?
2. Di dalam sebuah aki yang menggunakan elektroda timbal, tersusun beberapa sel-sel elektrokimia yang tiap selnya akan menghasilkan sekitar 2 V. Untuk menghasilkan baterai aki dengan tegangan sumber sebesar 12 V, maka sel-sel di dalam aki harus disusun sedemikian rupa (secara seri) agar tegangan yang diinginkan dapat tercapai.
  - a. Menurut kamu, apa sajakah yang dapat mempengaruhi tegangan yang dihasilkan oleh sel pada aki?
  - b. Bagaimana pengaruh perbandingan konsentrasi cairan elektrolit dan air pada aki, terhadap tegangan/ arus yang dihasilkan?
  - c. Bagaimana menentukan lama atau tidaknya sebuah baterai aki bertahan?
  - d. Mengapa elektroda berjenis timbal sering digunakan? Bagaimana pengaruhnya jika senyawa lainnya (di dalam

deret volta) digunakan sebagai pengganti timbal (Pb) dan timbal oksida (PbO<sub>2</sub>)?



# BAB 6

## SABUN DAN DETERGEN SERTA KAITANNYA DENGAN FLUIDA

### **Kompetensi Dasar**

Menelaah dan menerapkan pengetahuan mahasiswa dengan cakupan pengetahuan faktual, konseptual, prosedural, dan metakognitif pada materi fluida dan tegangan permukaan.

### **Tujuan Pembelajaran**

Melalui pembelajaran pada materi ini, mahasiswa diharapkan:

1. Mengetahui fenomena yang terjadi pada fluida di sekitar.
2. Mengidentifikasi fenomena tegangan permukaan dan contohnya di dalam kehidupan sehari-hari.
3. Menjelaskan kaitan antara gaya adhesi dan kohesi di dalam fenomena tegangan permukaan.
4. Menguraikan pengaruh sabun dan detergen terhadap tegangan permukaan yang diaplikasikan dalam berbagai kegiatan sehari-hari.

### **Pendahuluan**

Kita sehari-hari sangat sering melihat peristiwa-peristiwa alam yang terjadi pada air, misalnya saja adanya tetes-tetes zat cair pada pipa keran, laba-laba air di atas permukaan air, dan gelembung sabun yang sering kita jadikan mainan saat kecil. Hal ini bisa terjadi karena terdapat gaya yang bekerja pada permukaan air yang disebut tegangan permukaan. Tegangan permukaan merupakan

kemampuan zat cair untuk menuju pada keadaan yang luas permukaannya lebih kecil, yaitu permukaan datar atau bundar seperti bola. Hal ini terjadi karena permukaan air (zat cair) memiliki kecenderungan untuk menegang sehingga permukaannya terlihat seperti selaput tipis.



Gambar 6.1 Contoh fenomena tegangan permukaan di alam  
Kehidupan kita pun sangat sulit terpisahkan dengan fenomena-fenomena tegangan permukaan ini, misalnya pada saat mencuci baju, air mesti dipaksa melalui ruang sempit antara serat baju yang membutuhkan penambahan luas permukaan air, dan sulit terjadi akibat adanya tegangan permukaan. Untuk mempermudahnya, biasanya digunakan metode tertentu untuk menurunkan tegangan permukaan air. Tegangan ini dapat dikurangi dengan melakukan pemanasan pada air dan/atau menambahkan sabun/detergen.

### **Fluida**

Kegiatan kita sehari-hari tidak lepas kaitannya dengan fluida yang memiliki peran yang sangat penting dalam kehidupan. Fluida adalah zat yang dapat mengalir dan mampu menyesuaikan diri dengan wadahnya. Fluida digolongkan menjadi dua macam: fluida cair (liquid) dan fluida gas (gas). Fluida cair memiliki sifat-sifat, yaitu memiliki permukaan bebas, hanya mengisi ruang (volume)

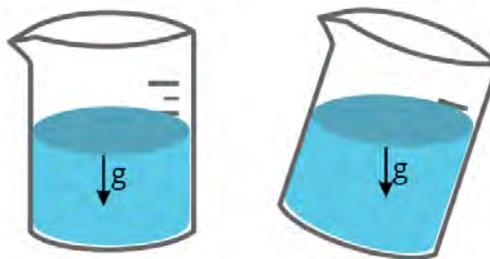
---

yang diperlukan, serta merupakan zat yang sulit dimampatkan. Sedangkan gas biasanya akan mengisi seluruh ruang, serta dapat dimampatkan.

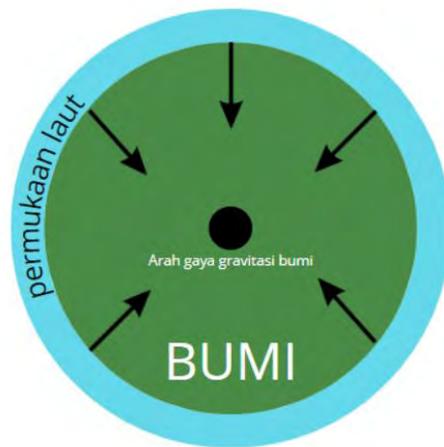
Kita telah mengetahui sebelumnya, bahwa fluida juga memiliki beberapa sifat khusus, antara lain: rapat massa (density), kekentalan (viscosity), tegangan permukaan (surface tension), kemampatan (compressibility), dan kapilaritas (capillarity). Perlu diketahui bahwa beberapa sifat tersebut merupakan kombinasi dari sifat fluida lainnya, misalnya kekentalan kinematic memiliki hubungan dengan kekenatalan dinamik dan rapat massa.

### **Bentuk Permukaan Fluida Statis**

Perlu diketahui bahwa di bawah pengaruh gaya gravitasi Bumi, bentuk permukaan zat cair statis selalu tegak lurus gaya gravitasi bumi. Karena gaya gravitasi bumi di suatu tempat arahnya ke bawah maka permukaan zat cair statis selalu berbentuk bidang horisontal (Gambar 6.2).



Gambar 6.2 Skema permukaan fluida yang tetap datar pada gelas Permukaan bumi, sebagian besar ditutupi oleh laut. Karena dipengaruhi oleh gravitasi bumi, permukaan laut akan tegak lurus dengan gaya gravitasi bumi yang selalu menuju pusat bumi. Sehingga, permukaan air laut akan tegak lurus jari-jari bumi, atau sesuai dengan permukaan bumi yang berbentuk bola (Gambar 6.3).



Gambar 6.3 Skema air di atas permukaan bumi

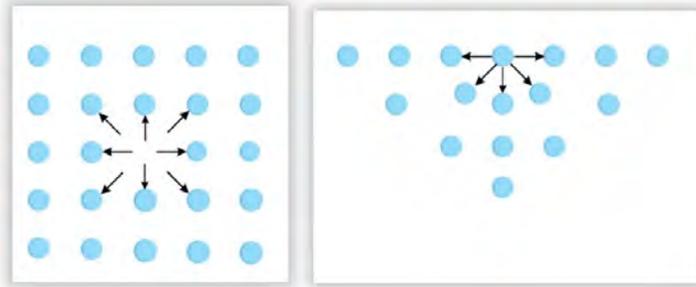
### **Tegangan Permukaan**

Jarum dapat mengapung di permukaan air jika diletakkan secara hati-hati. Ketika mengapung, gaya yang menopang jarum tersebut bukanlah gaya apung, melainkan diakibatkan oleh tegangan permukaan. Tegangan permukaan merupakan suatu kejadian yang menarik pada pembahasan fluida statis. Fenomena ini terjadi dikarenakan selaput zat cair berada dalam kondisi tegang, yang bekerja parallel terhadap permukaan dan timbul akibat adanya gaya tarik menarik antar molekul. Tegangan dapat diartikan sebagai kerja yang dilakukan untuk memperluas permukaan cairan dalam satuan luas.



Gambar 6.4 Fenomena mengapungnya jarum di atas permukaan air

Pada cairan, sebuah molekul dikelilingi oleh molekul lainnya. Namun pada bagian permukaan, tidak terdapat molekul di atas molekul permukaan zat cair. Jika molekul permukaan sedikit dinaikkan, ikatan antar molekul (disekitarnya) juga akan ikut merenggang, dan akan ada gaya pemulih yang berusaha menarik molekul tersebut menuju permukaan. Permukaan zat cair cenderung memiliki sifat merenggang, oleh karena itu permukaannya seakan ditutupi oleh suatu lapisan elastis. Hal ini disebabkan oleh gaya tarik menarik antar partikel sejenis di dalam zat cair, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.5.



Gambar 6.5 Mekanisme gaya antar molekul air

Pada cairan, setiap molekul saling menarik dengan molekul lain yang sejenis didekatnya dengan gaya yang sama ke segala arah. Akibatnya, tidak ada sisa resultan gaya yang bekerja pada masing2 molekul seperti pada Gambar 6.5. Pada permukaan cairan, tiap molekul ditarik dengan arah hanya ke samping dan ke bawah, namun tidak ditarik oleh molekul di atasnya karena yang ada hanya udara yang memiliki jarak antar molekul yang sangat renggang (Gambar 6.5.b). sehingga, terdapat perbedaan gaya tarik yang mengakibatkan adanya sisa gaya yang bekerja pada lapisan atas cairan. Gaya tersebut mengarah ke bawah, karena molekul di bawah permukaan cairan jumlahnya lebih banyak dan jaraknya lebih rapat. Gaya ke bawah tadi menyebabkan permukaan cairan

berkontraksi dan menegang. Tegangan ini disebut tegangan permukaan.

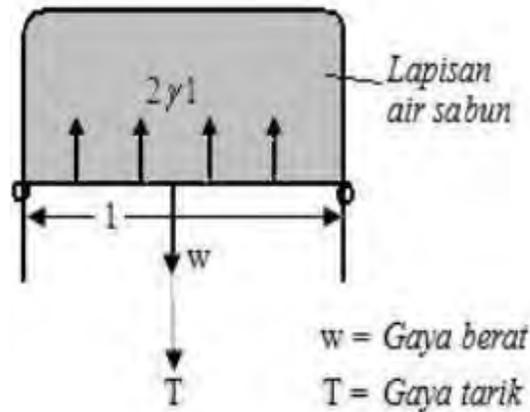
Sejumlah pengamatan juga menunjukkan bahwa permukaan zat cair memiliki perilaku seperti membran yang meregang karena tegangan. Contohnya, setetes air yang menetes di ujung keran, atau tetesan air pada daun di pagi hari, yang berbentuk hampir bundar seperti balon air. Klip kertas juga dapat diam di permukaan air walaupun memiliki kerapatan yang lebih besar dibandingkan air. Sejumlah serangga juga mampu berjalan di permukaan air dengan membuat lekukan tanpa masuk ke dalamnya. Fenomena tersebut adalah contoh tegangan permukaan, dimana permukaan zat cair seolah-olah memiliki lapisan yang menegang. Selain itu, adanya tegangan permukaan membuat zat cair berusaha untuk menyusut atau mendapatkan luas permukaan terkecil karena dianggap memiliki energi terendah (paling stabil). Bentuk yang memenuhi keadaan ini adalah bentuk seperti bujur telur (sferis).



Gambar 6.6 Tetesan Air yang terbentuk akibat tegangan permukaan  
Pada Gambar 6.7, terlihat bahwa kita dapat melakukan pengukuran secara kuantitatif pada tegangan permukaan. Sebuah kawat dimodifikasi sedemikian rupa hingga membentuk lekukan

---

huruf U, dan kawat lainnya sebagai peluncur diletakkan pada ujung kawat berbentuk U.



Gambar 6.7 Fenomena percobaan pembentukan gelembung air sabun Ketika dimasukkan ke dalam larutan sabun dan dikeluarkan, akan membentuk lapisan cairan yang memberikan gaya tegangan permukaan yang menarik yang menarik peluncur dengan cepat menuju bagian atas kawat berbentuk U (jika berat peluncur tidak terlalu besar). Ketika luas lapisan seolah-olah meluas, molekul-molekul akan bergerak dari bagian dalam cairan ke dalam lapisan permukaan. Lapisan permukaan tidak teregang dengan mudah seperti lembaran karet. Sebaliknya, lebih banyak permukaan dibentuk oleh molekul-molekul yang bergerak dari bulk cairan.

Untuk memertahankan peluncur berada pada kesetimbangan, dibutuhkan gaya total ke bawah

$$F = w + T \tag{6.1}$$

Di dalam kesetimbangan,  $F$  akan sama dengan gaya tegangan permukaan yang diberikan lapisan sabun pada peluncur, dengan  $l$  adalah panjang peluncur kawat. Perlu diketahui bahwa lapisan cairan tersebut memiliki dua sisi permukaan, sehingga bisa

dikatakan bahwa gaya  $F$  bekerja pada panjang total  $2l$ . Tegangan permukaan (surface tension)  $\gamma$  dalam lapisan diformulasikan sebagai perbandingan antara gaya tegangan permukaan  $F$  dengan panjang  $d$  di mana gaya bekerja:

$$\gamma = \frac{F}{d} \quad (6.2)$$

Dimana,

$\gamma$  = tegangan permukaan ( $N/m$ )

$F$  = gaya ( $N$ )

$d$  = panjang permukaan ( $m$ ).

Jika  $d = 2l$ , maka:

$$\gamma = \frac{F}{2l} \quad (6.3)$$

Dimana,

$l$  = panjang permukaan selaput fluida ( $m$ ).

Besar kerja yang diperlukan untuk memperluas permukaan dapat dihitung dengan persamaan:

$$W = F \Delta x \quad (6.4)$$

$$W = \gamma L \Delta x$$

$$W = \gamma \Delta A$$

Dimana,

$W$  = Usaha (*Joule*)

$\Delta A$  = penambahan luas ( $m^2$ )

$\Delta x$  = perubahan jarak ( $m$ ).

---

Jika  $\Delta A = L \Delta x$  adalah total penambahan luas, jadi dapat dituliskan:

$$\gamma = \frac{W}{\Delta A} \quad (6.5)$$

Oleh karena itu, tegangan permukaan tidak hanya sebanding dengan gaya per satuan panjang, namun juga sebanding dengan kerja per satuan penambahan luas permukaan. Sehingga,  $\gamma$  dapat juga dinyatakan dalam  $N/m$  atau  $J/m^2$ .

Umumnya Zat cair memiliki permukaan mendatar, lain halnya jika bersentuhan dengan zat padat (misal dinding wadah bejana), maka permukaan yang bersentuhan akan melengkung yang disebut dengan miniskus.

Terdapat dua jenis miniskus, miniskus cekung dan miniskus cembung. Miniskus cekung terjadi jika gaya tarik menarik antar partikel di permukaan zat cair dengan partikel zat padat (gaya adhesi) lebih besar dibandingkan dengan gaya tarik menarik antar partikel zat cair (gaya kohesi). Sehingga permukaan cairan bagian tepi yang bersentuhan dengan dinding cenderung akan naik yang membuat permukaan menjadi cekung.

Tegangan permukaan memiliki nilai yang berbeda untuk tiap jenis cairan dan suhunya. Secara umum, zat cair yang mempunyai gaya tarik antar molekul yang besar, maka tegangan permukaannya juga besar. Namun sebaliknya, zat cair yang gaya tarik antar molekulnya kecil, maka tegangan permukaannya juga kecil (cth: bensin, dll).

Tegangan permukaan akan menurun jika suhunya meningkat, karena dengan penambahan suhu, cairan akan bergerak lebih cepat dan mengurangi interaksi antar molekul sehingga tegangan permukaannya menurun. Di suhu yang sama, tegangan

---

permukaan logam cair dan lelehan garam, akan lebih besar dibanding cairan organik. Besarnya tegangan permukaan cairan tercantum pada tabel X.

Tabel 6.1 Tegangan permukaan berbagai macam jenis zat cair

Zat Cair	Suhu (°C)	$\gamma$ (dyne/cm)
Raksa	20	460
Air	20	72,75
Plasma darah	37	73,0
Darah	37	58,0
Gliserin	20	63,1
Minyak zaitun	20	32,0
Benzene	20	28,9
CCL <sub>4</sub>	20	26,8
Larutan Sabun	20	25
Etanol	20	22,3

Zat terlarut yang terdapat pada cairan mampu menaikkan ataupun menurunkan tegangan permukaan, namun bergantung pada sifat zat terlarut. Di sisi lain, zat terlarut yang memiliki susunan kimia sama hampir tidak mempengaruhi. Pada air, adanya elektrolit anorganik dan non-elektrolit tertentu seperti sukrosa dan gliserin mampu menaikkan tegangan permukaan. Sedangkan sabun, detergen, dan alcohol mampu secara efektif menurunkan tegangan permukaan. Zat-zat ini disebut sebagai surface active agents atau surfactance. Tegangan permukaan yang turun oleh sabun menyebabkan film air meluas dengan membentuk gelembung atau busa.

Terdapat kaitan antara tegangan permukaan dengan kemampuannya untuk membasahi benda. Semakin kecil nilainya, maka makin besar kemampuan benda tersebut untuk membasahi benda. Hal ini sering dimanfaatkan di sekitar kita, contohnya saja untuk menghasilkan pakaian yang lebih bersih dapat menggunakan air panas atau sabun. Keduanya mampu menurunkan tegangan permukaan air yang meningkatkan kemampuan air membasahi dan sampai ke kotoran pakaian yang

membuat kotoran mudah larut dan terbawa saat dibilas. Alcohol dan antiseptic yang digunakan pada luka juga memiliki nilai tegangan permukaan rendah, sehingga dapat membasahi seluruh permukaan luka.

### **Koloid**

Koloid adalah disperse partikel kecil ( $< 500$  nm) dari suatu material ke dalam material lain. Umumnya, partikel tersebut adalah kumpulan dari atom atau molekul, namun terlalu kecil untuk dilihat dengan mikroskop optik biasa. Partikel ini mampu melewati kertas saring, namun tetap dapat terdeteksi dengan hamburan sinar, osmosis, dan sedimentasi.

Terdapat beberapa fasa yang terkait di dalam pembahasan koloid. Sol, yang merupakan disperse padatan dalam cairan atau padatan dalam padatan. Aerosol, yang merupakan disperse cairan dalam gas (kabut) dan padatan dalam gas (asap). Serta Emulsi, yang merupakan disperse cairan dalam cairan (susu).

Berdasarkan pembentukannya, koloid dibedakan menjadi koloid disperse, asosiasi, dan makromolekul.

1. Koloid Dispersi merupakan koloid yang terbentuk melalui penyebaran partikel yang tidak larut dalam medium (fasa pendispersi) dengan membentuk agregat molekul atau atom yang sangat banyak. Misalnya disperse koloid emas (Au) dan belerang (S)
2. Koloid asosiasi merupakan koloid yang terbentuk dari gabungan molekul, atom, atau ion yang larut dalam medium hingga membentuk agregat yang disebut misel. misalnya larutan sabun dan detergen.

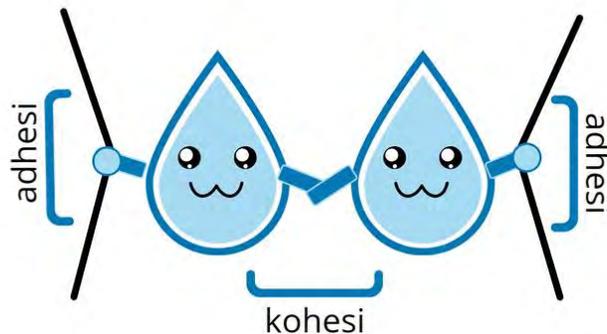
3. Koloid makromolekul merupakan koloid yang terbentuk dari molekul tunggal berukuran besar. Misalnya protein dan polimer tinggi seperti karet dan plastic.

Partikel di dalam suatu zat akan terus bergerak. Gerakan tersebut bisa bersifat acak (pada zat cair dan gas), atau hanya bervibrasi (pada zat padat). Sistem koloid bermedium pendispersi zat gas atau cair, pergerakan partikel akan menghasilkan tumbukan dengan partikel koloid itu sendiri yang berlangsung ke segala arah. Karena kecilnya ukuran partikel, maka tumbukan yang terjadi tidak seimbang. Akibatnya terdapat resultan tumbukan yang menyebabkan perubahan arah gerak partikel sehingga terjadi gerak zigzag atau gerak brown.

Makin kecil ukuran partikel koloid, maka makin cepat gerak Brown terjadi. Demikian pula, makin besar ukuran partikel koloid, makin lambat pula gerak Brown yang terjadi. Ini menjelaskan kenapa gerak brown sangat sulit diamati dan tidak ditemukan dalam zat padat.

Suhu juga mempengaruhi gerak Brown. Makin tinggi suhu pada sistem Koloid, makin besar pula energi kinetic yang dimiliki partikel medium pendispersinya. Sehingga, gerak brown yang dimiliki oleh partikelnya makin cepat, dan berlaku sebaliknya.

## Kohesi dan Adhesi



Gambar 6.8 Penggambaran gaya adhesi dan kohesi pada molekul air. Partikel zat padat atau cair dapat menyatu membentuk sesuatu (benda), disebabkan adanya gaya tarik menarik antar partikel. Kohesi merupakan gaya saling tarik menarik antara partikel sejenis. Gaya kohesi yang terdapat pada zat padat memiliki kekuatan yang paling besar diantara kedua jenis zat lainnya (cair dan gas). Jika gaya kohesi yang dimiliki makin besar, akan menyebabkan suatu zat (mis. Zat padat) makin sulit dipotong atau patah.

Sedangkan gaya tarik menarik antar partikel yang tidak sejenis, disebut adhesi. Gaya ini menyebabkan partikel cenderung meninggalkan zat sejenis, contohnya saja saat tinta dituliskan pada kertas.

### Kegunaan Koloid pada Bahan Pencuci

Detergen dapat digunakan sebagai pembersih kotoran pada baju dan kain. Fungsinya adalah sebagai pengemulsi minyak dalam air. Sabun terionisasi dalam air menjadi  $\text{Na}^+$  dan anion asam lemak. Bagian ujung lemak yang bermuatan negative memiliki sifat polar dan larut dalam air, sedangkan ujung lain memiliki sifat non polar

dan larut dalam minyak. Ini menyebabkan kotoran yang berupa noda minyak larut dalam air hingga mudah lepas saat dibilas.

## **STEM**

### **Sabun dan Detergen**

Perbedaan sabun dan detergen adalah bahan utama pembuatannya. Sabun terbuat dari bahan utama dari campuran asam lemak dan alkali, sedangkan detergen bahan utamanya menggunakan surfaktan dan daya cuci detergen lebih baik dibandingkan dengan sabun. Detergen adalah campuran senyawa kimia yang digunakan sebagai bahan pembersih



Gambar 6.9 Contoh detergen

### **Sabun**

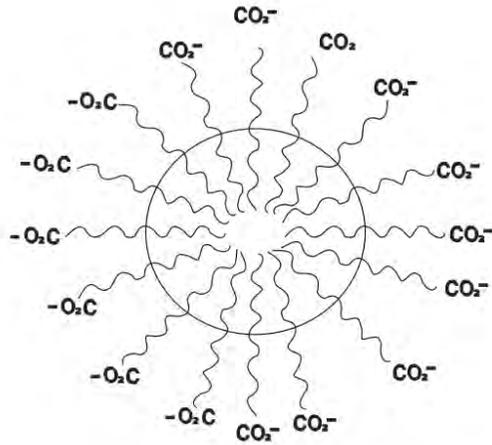
Sabun merupakan garam logam alkali dari asam-asam lemak. Kandungan utama sabun adalah  $C_{16}$  dan  $C_{18}$ , serta karboksilat namun dengan kandungan yang lebih rendah. Garam kalium atau natrium dihasilkan oleh asam lemak yang dapat larut di dalam air dan dikenal sebagai sabun. Pada sektor industry, sabun biasanya tidak diproduksi dari asam lemak, namun minyak yang berasal dari tumbuh-tumbuhan. Minyak merupakan ester asam lemak tidak jenuh dengan gliserol. Dengan proses hidrogenasi dan

---

bantuan katalis logam Pt atau Ni, asam lemak tadi diubah menjadi asam lemak jenuh, serta melalui metoda penyabunan dengan basa (NaOH atau KOH) maka akan terbentuk sabun dan gliserol.

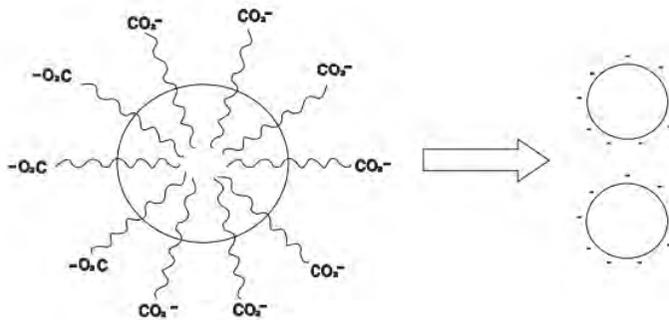
Natrium lauril sulfat adalah deterjen yang sangat baik karena garamnya berasal dari asam kuat, dan larutannya hampir netral. Garam kalsium dan magnesium yang terdapat di dalamnya tidak mengendap dalam larutan. Detergen yang umum digunakan adalah alkil benzenasulfonat berantai lurus. Pembuatannya melalui tiga tahap, Alkena rantai lurus dengan jumlah karbon 14-14 direaksikan dengan benzena dan katalis Friedel-Craft ( $\text{AlCl}_3$  atau HF) membentuk alkil benzena. Sulfonasi dan penetralan dengan basa melengkapi proses ini. Rantai alkil sebaiknya tidak bercabang, Alkil benzenasulfonat yang bercabang bersifat tidak dapat diurai oleh jasad renik (biodegradable). Detergen ini mengakibatkan masalah polusi berat pada tahun 1950-an, yaitu berupa buih pada unit-unit penjernihan serta di sungai dan danau-danau. Sejak tahun 1965, digunakan alkil benzenasulfonat yang tidak bercabang. Detergen jenis ini mudah diurai secara biologis oleh mikroorganisme dan tidak berakumulasi di lingkungan.

Sabun terdiri dari rantai hidrokarbon dengan gugus  $-\text{COO}^-$  di ujungnya. Bagian hidrokarbon bersifat hidrofob, artinya tidak suka pada air atau tidak mudah larut dalam air. Sedangkan gugus  $-\text{COO}^-$  bersifat hidrofil, artinya suka akan air, jadi dapat larut dalam air. Sehingga, sabun tidak sepenuhnya larut dalam air, namun membentuk misel (kumpulan rantai hidrokarbon dengan ujung yang bersifat hidrofil, seperti pada Gambar 6.10).



Gambar 6.10 kumpulan rantai hidrokarbon dengan ujung yang bersifat hidofil

Sabun dimanfaatkan sebagai pembersih minyak dan lemak, sehingga dapat berfungsi sebagai emulgator (pengemulsi). Saat proses emulsi ini, bagian hidrofob molekul sabun mencapai ke bagian dalam lemak, sedangkan ujung lainnya berada di bagian luar. Karena adanya gaya tolak menolak antar muatan listrik negative, kotoran pun memecah menjadi partikel lebih kecil dan membentuk emulsi seperti pada Gambar 6.11.



Gambar 6.11 Terpecahnya rantai hidrokarbon menjadi partikel lebih kecil

Sehingga, kotoran mudah terlepas dari kain dan benda lainnya. Kemampuan dari sabun untuk mengemulsi kotoran berminyak ini disebabkan oleh dua sifat sabun. Pertama, rantai hidrokarbon

sebuah molekul sabun larut dalam zat non-polar, seperti tetesan-tetesan minyak. Kedua, ujung anion molekul sabun, yang tertarik pada air, ditolak oleh ujung anion molekul-molekul sabun yang menyembul dari tetesan minyak lainnya. Karena tolak menolak antara tetes-tetes sabun – minyak, maka minyak itu tidak dapat saling bergabung, tetapi tetap tersuspensi.

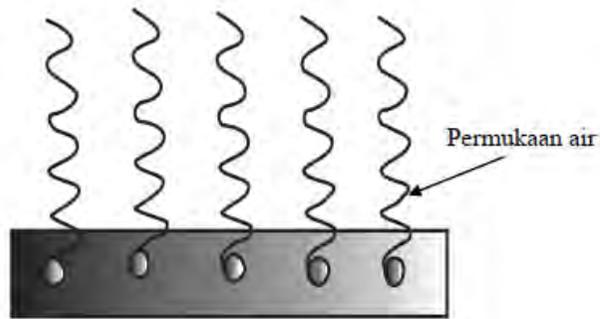
### **Detergen/Surfaktan (Surface Active Agent)**

Surfaktan merupakan zat aktif permukaan yang mempunyai dua ujung, hidrofilik dan hidrofobik. Di dalam molekulnya memiliki sedikitnya satu gugus hidrofilik dan satu gugus hidrofobik. Apabila ditambahkan ke dalam suatu cairan, maka surfaktan dapat mempengaruhi karakteristik tegangan permukaan dan antarmuka cairan tersebut. Permukaan adalah antarmuka tempat satu fasa kontak dengan gas, yaitu udara. Sedangkan antarmuka adalah bagian di mana dua fasa saling bertemu/kontak. Secara umum, lambang surfaktan digambarkan pada Gambar 6.12.



Gambar 6.12 Lambang surfaktan

Cara surfaktan menurunkan tegangan permukaan air adalah dengan mematahkan ikatan hydrogen pada permukaan dengan menaruh kepala hidrofiliknya pada permukaan air dan ekor hidrofobiknya menjauhi permukaan air, seperti pada Gambar 6.13.



Gambar 6.13 Mekanisme surfaktan menurunkan tegangan permukaan air

Surfaktan disebut sebagai zat yang dapat mengaktifkan permukaan, karena cenderung untuk terkonsentrasi pada permukaan atau antar muka. Surfaktan diklasifikasikan menjadi dua jenis besar, yaitu yang dapat larut dalam minyak dan dapat larut dalam air.

1. Surfaktan yang larut dalam minyak

Tiga senyawa yang termasuk dalam jenis ini adalah, senyawa polar berantai, senyawa fluorocarbon, dan senyawa silicon

2. Surfaktan yang larut dalam air

Jenis ini banyak digunakan sebagai zat pembasah, pembusa, pengemulsi, detergen, pencegah korosi, dll.

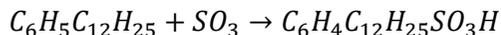
Surfaktan merupakan zat aktif permukaan dan termasuk bahan kimia organik serta memiliki rantai kimia yang sulit diuraikan di alam. Zat ini bersifat racun bila dihirup, diserap melalui kulit atau termakan. Terdapat empat klasifikasi surfaktan, yaitu:

1. Anionik

Detergen anionik adalah detergen yang mengandung surfaktan anionic serta dinetralisasi dengan alkali. Jenis ini akan berubah menjadi partikel bermuatan negatif apabila dilarutkan dalam air. Biasanya digunakan untuk pencuci kain.

- a. Alkyl Benzene Sulfonate (ABS)

Hingga tahun 1960-an, surfaktan yang paling umum digunakan adalah alkylbenzene sulfonate yang merupakan produk derivat dari alkylbenzene. ABS sangat lambat terurai oleh karena ada rantai bercabang pada strukturnya. Sehingga, ABS digantikan oleh surfaktan yang lebih mudah terurai yang dikenal dengan Linear Alkyl Sulfonate (LAS). Proses pembuatan ABS adalah dengan mereaksikan Alkyl Benzene dengan Belerang Trioksida, asam Sulfat pekat atau Oleum. Reaksi ini menghasilkan Alkyl Benzene Sulfonate. Jika dipakai Dodekil Benzene maka persamaan reaksinya adalah:

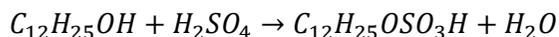


(Dodekil Benzena Sulfonat)

Reaksi selanjutnya adalah netralisasi dengan NaOH sehingga dihasilkan Natrium Dodekil Benzena Sulfonat.

b. Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS)

LAS adalah surfaktan yang paling banyak digunakan, terutama produk pembersih dan detergen. Pembuatan LAS dilakukan dengan proses mereaksikan Lauril Alkohol dengan asam Sulfat pekat menghasilkan asam Lauril Sulfat dengan reaksi:



Asam Lauril Sulfat yang terjadi dinetralisasikan dengan larutan NaOH sehingga dihasilkan Natrium Lauril Sulfat.

c. Alpha Olein Sulfonate (AOS)

2. Kationik

Surfaktan jenis ini memiliki muatan positif yang banyak digunakan sebagai penghambat korosi, agen antimikroba, dll. Gugus fungsi dari surfaktan kationik yaitu: Amina, ammonium, heterosiklik. Contohnya : Garam Ammonium

3. Non Ionik

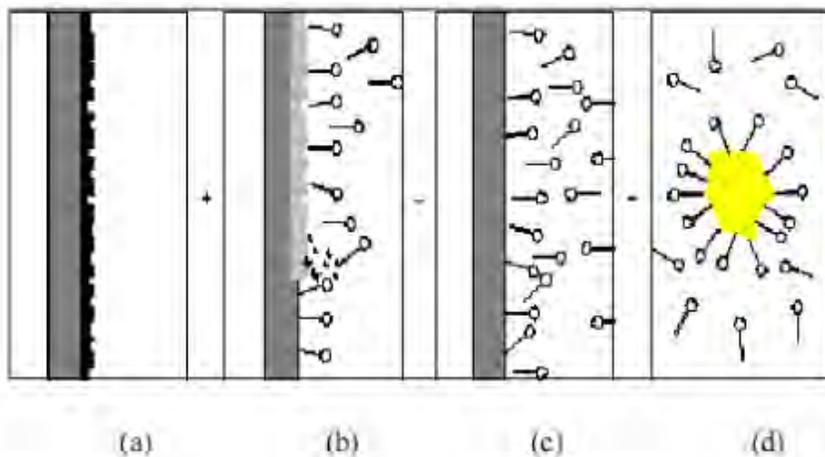
Surfaktan non ionik merupakan surfaktan yang tidak mengandung ion, surfaktan non ionik merupakan 40% dari penggunaan surfactant, dan lebih umum dijumpai pada industri dibandingkan anionik. Gugus non ionik dari surfaktan antara lain ester, eter, amina, alkil ester, alkanol amina, alkil poli glikosida. Surfaktan nonionic secara umum lebih toleran dibanding anionik di air keras, karena surfaktan nonionic lebih

---

efektif dibanding surfaktan lain untuk menghilangkan minyak tanak dari kain sintetik. Hampir semua non ionik menghasilkan rendah busa, dan dapat digunakan dan larut pada air dingin. Sedangkan surfaktan mempunyai daya pembentuk busa yang tinggi, terutama surfaktan anionik yang mempunyai rantai alkyl  $C_{12}$ - $C_{14}$ . Contohnya: Nonyl phenol polyethoxyle

#### 4. Amphoteric

Surfaktan amphoteric dapat mengandung anion dan kation. Sifatnya tergantung dari kadar pH (ion zwitter). Apabila  $pH < 7$  maka surfaktan bersifat anion. Apabila  $pH > 7$  maka surfaktan bersifat kation. Gugus fungsional dari surfaktan jenis ini adalah Amina oksida, alkil betain, dan Imidazolinium betain. Contohnya adalah Acyl Ethylenediamines.



Gambar 6.14 Ilustrasi pengikatan kotoran

Ilustrasi pengikatan kotoran terlihat pada Gambar 6.14, dimana kotoran diikat oleh surfaktan sebagai komponen utama detergen. (a) saat kotoran menempel pada permukaan benda, (b) kotoran diikat oleh molekul surfaktan, (c) permukaan

bersih, (d) molekul surfaktan menjaga kotoran agar tidak kembali ke permukaan benda.

Konsumen lebih memilih detergen yang menghasilkan lebih banyak busa dan dianggap lebih efektif kegunaannya, padahal ini adalah asumsi yang salah. Tidak ada kaitan antara busa yang dihasilkan dengan daya bersih detergen. Untuk pemanfaatan di kegiatan rumah tangga sehari-hari, busa tidak memiliki peran yang signifikan karena biasanya dipakai bersamaan dengan air yang melimpah. Akan tetapi, jika air yang digunakan sangat sedikit (misalnya untuk mencuci karpet), busa akan berperan untuk tetap menahan partikel kotoran yang telah terlepas dan mencegahnya kembali ke permukaan karpet.

### **Soal**

1. Dengan penjelasan mengenai tegangan permukaan pada bab ini, dapatkah kamu menjelaskan bagaimana mekanisme mengapungnya laba-laba air di atas permukaan air?
2. Terdapat beberapa hewan unggas yang dapat mengapung di permukaan air, seperti bebek, angsa, dan burung. Apakah hewan-hewan ini menggunakan mekanisme yang sama dengan laba-laba air? Jika tidak, coba jelaskan perbedaannya!
3. Sebuah jarum dengan panjang 3,2 cm diletakkan perlahan dan akhirnya dapat mengapung di permukaan air karena memiliki massa yang relative tidak terlalu berat.
  - a. Berapa berat maksimum yang dimiliki oleh jarum tersebut?
  - b. Jika dalam kasus lainnya, dengan jarum yang sama, apakah jarum akan mampu mengapung jika air yang dipakai diganti menjadi air sabun?

4. Saat mencuci pakaian atau kain, turunnya tegangan permukaan cairan mempengaruhi kemampuan zat cair tersebut untuk mencapai pori-pori kecil pada pakaian. Sehingga, deterjen digunakan untuk menurunkan tegangan permukaan. Menurut kamu, adakah pengaruh antara konsentrasi deterjen yang digunakan dengan turunnya tegangan permukaan? Jika ada, bagaimana cara mengetahuinya?



# BAB 7

## SUPERKONDUKTOR

### Tujuan Pembelajaran

1. Menjadi lebih familiar dengan karakteristik superkonduktor.
2. Menganalisis karakteristik unsur kimia yang digunakan sebagai bahan superkonduktor.
3. Memahami metode sintesis superkonduktor.
4. Menganalisis karakteristik superkonduktor suhu tinggi.
5. Memahami aplikasi superkonduktor sebagai bantalan/*bearing* magnetik pada *flywheel* (roda gila)

### Pendahuluan

Fungsi *Flywheel* (roda gila) yang cukup vital adalah menyimpan tenaga mekanik atau yang biasa dikenal dengan momen inersia. Tenaga mekanik perlu disimpan agar kinerja mesin tetap stabil dan tidak menurun. Tenaga mekanik atau momen inersia dapat dihasilkan mesin ketika sedang melakukan usaha. Inilah mengapa momen inersia hanya akan terbentuk ketika mesin sedang bekerja atau sedang hidup. Dalam hal ini, *flywheel* akan bertugas untuk menyeimbangkan tenaga mekanik dengan menyimpannya.

Pada saat sistem mesin konvensional yang dinyalakan dengan menggunakan bahan bakar maka mesin sedang menggunakan energi kimia dalam jumlah besar. Pada peristiwa ini terjadi perubahan energi dari energi kimia menjadi energi mekanis. Perubahan energi ini dapat terjadi akibat roda gila mampu menghasilkan daya putar mesin. Fungsi *flywheel* atau roda gila

akan mempengaruhi gerak piston-piston di dalamnya sehingga terjadi perubahan mesin yang sangat masif. Gerakan masif ini dibantu dengan suplai energi yang terus menerus selama mesin dinyalakan.

Selanjutnya, daya putar ini akan membuat poros engkol berputar pula. Dalam kondisi yang baik, poros engkol dapat berputar secara stabil. Perputaran poros engkol secara stabil didapatkan dari energi yang berasal dari piston-piston secara bergantian. Selama mesin menyala, piston-piston ini akan menghasilkan energi mekanik dan roda gila memiliki kemampuan menahan suplai energi pada poros engkolnya sehingga tidak terjadi kelebihan tenaga dan poros engkol mesin dapat tetap berputar dengan stabil.

Karena fungsi *flywheel* dapat menyimpan energi mekanik atau momen inersia, maka flywheel disebut sebagai inhibitor daya putar pada mesin. Mesin membutuhkan inhibitor daya putar karena sering kali suplai energi mekanik dari piston berlebihan. Akibatnya mesin butuh penyesuaian agar perputarannya tetap stabil. Hal ini merupakan fungsi roda gila yang cukup vital.

Kestabilan daya putar mesin ini dipengaruhi oleh kondisi roda gila. Semakin baik kondisinya, maka akan semakin maksimal pula kinerjanya. Roda gila akan membantu putaran mesin menjadi stabil. Dalam hal ini roda gila akan menghambat suplai energi mekanik atau menyalurkan energi putar dari piston ke mesin. Mesin yang menyala menandakan piston sedang mengkonsumsi bahan bakar dan terjadi langkah kerja. Sayangnya, tidak selamanya proses pembakaran berlangsung selalu baik. Sering juga ditemui proses pembakaran pada mesin terjadi secara tidak konsisten/seimbang.

---

Proses pembakaran yang tidak seimbang inilah yang nantinya membuat kecepatan putaran menjadi mudah berubah. Padahal, mesin membutuhkan kecepatan putar yang stabil agar dapat berjalan dengan baik. Kecepatan putar yang terjadi di poros engkol ini secara langsung dipengaruhi dengan proses pembakaran. Apabila proses pembakaran tidak seimbang, perputaran poros engkol dapat menjadi lebih cepat atau melambat.

Roda gila konvensional terbuat dari bahan baja dengan mutu tinggi yang diikat oleh baut pada bagian belakang poros engkol. Roda gila dilengkapi dengan ring gear yang dipasangkan dibagian luarnya, fungsinya untuk mengaitkan dengan gigi pinion dari motor starter. Sehingga roda gila juga berfungsi untuk menerima tenaga putar dari motor starter, dan kemudian meneruskannya ke poros engkol, sehingga poros engkol dapat berputar dan mesin dapat mulai hidup.

Roda gila dipasang kukuh pada ujung poros engkol sehingga tidak mudah bergeser dari dudukannya. Ini untuk menjamin agar roda gila, mesin, dan kode penyalaan tetap pada posisi yang benar. Selain itu, tepat ditengah roda gila ada lubang kecil untuk bantalan/bearing peluru yang berfungsi menahan ujung bagian depan poros kopling.

*Flywheel* konvensional terbuat dari bahan dasar baja yang memiliki kualitas tinggi. Bentuknya seperti piringan dengan bobot yang cukup berat. Pada mobil yang biasa mengangkut penumpang bobot dari komponen ini bisa sebesar 7,5-50 kg. Semakin besar kendaraan, maka semakin berat pula bobot roda gila. Namun, kini komponen ini juga mengalami kemajuan saat ini. Sudah tersedia *flywheel* dari bahan serat karbon serta bantalan/bearing magnet. *Bearing* atau bantalan memiliki peran penting dalam

---

sebuah mekanisme mesin karena fungsinya yang dapat membantu poros agar bisa berputar tanpa mengalami gesekan berlebih.

Pada bab ini akan diuraikan aplikasi superkonduktor sebagai bearing superkonduktor pada sistem roda gila. Bab ini akan mengungkap konsep sains berkaitan levitasi magnetik dari superkonduktor kemudian dilanjutkan dengan desain teknologi aplikasi superkonduktor sebagai bearing superkonduktor yang digunakan pada roda gila.

### **Mengenal Superkonduktor**

Superkonduktor (meskipun disebut superkonduktor suhu tinggi) hanya terjadi pada suhu yang sangat rendah. Banyak material yang tidak memperlihatkan sifat superkonduktivitas sampai material ini didinginkan mendekati suhu absolut.

Tahun 1898 merupakan awal dari eksplorasi kriogenik. Dimulai oleh James yang telah sukses membuat Hidrogen cair pada suhu 20°K. Kamerling Onnes pada tahun 1908 telah sukses menghasilkan Nitrogen cair dengan laju 0,28 liter per jam. Onnes berpendapat bahwa Helium cair merupakan substansi yang penting, karena boiling point He sangat rendah (4,2 °K pada tekanan 1 atm) sehingga dengan menggunakan He cair, maka resistansi logam pada suhu rendah dapat diselidiki. Tapi Onnes malah memilih untuk menyelidiki Merkuri (Hg), karena Merkuri berbentuk liquid pada suhu kamar. Onnes menggunakan proses distilasi standar untuk mendapatkan sampel Merkuri murni.

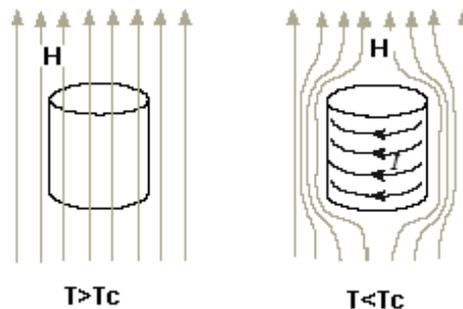
Hal yang sangat mengejutkan terjadi pada tahun 1911, ketika Gilles Holst mencelupkan pipa kapiler berisi merkuri kedalam He cair dan kemudian diukur resistansinya. Pada suhu yang mendekati 4,2 °K, Holst menemukan sesuatu yang aneh, resistansi

Hg turun sampai menuju nol. Kemudian Onnes melakukan eksperimen beberapa kali untuk membuktikan bahwa hasil pengamatan tersebut adalah real (nyata). Pada tahun yang sama, sampel Merkuri lain disiapkan dan memperlihatkan sifat yang sama, oleh karena itu Kamerling Onnes melaporkan bahwa dibawah suhu kritis, Merkuri telah melewati keadaan yang baru, memperlihatkan sifat elektrik yang luar biasa yang disebut keadaan superkonduktivitas. Arus mengalir melalui kawat merkuri terus-menerus.

Karena tidak adanya resistansi, maka arus dapat mengalir tanpa kehilangan energi. Dengan mengalirkan arus pada suatu kumparan superkonduktor dalam suatu rangkaian tertutup, kemudian mencabut sumber arusnya lalu mengukur arusnya satu tahun kemudian ternyata arus masih tetap mengalir. Fenomena ini kemudian oleh Onnes diberi nama superkonduktivitas. Pada tahun 1913, ia menerima hadiah nobel dalam bidang Fisika untuk penelitian sifat bahan pada suhu rendah. Onnes juga telah berhasil mengidentifikasi superkonduktor baru yaitu timah dan timbal, keduanya lebih mudah digunakan dalam eksperimen daripada Merkuri dalam pipa kapiler. Pada tahun yang sama, Onnes juga menemukan nilai ambang (threshold value) rapat arus yang dapat dialirkan pada sampel superkonduktor sebelum sampel berubah ke keadaan normal, ini dikenal dengan rapat arus kritis  $J_c$ . Onnes juga berhasil menunjukkan  $J_c$  sebagai fungsi suhu,  $J_c$  akan meningkat jika suhu superkonduktor diturunkan. Onnes juga menyatakan bahwa medan magnet juga dapat merusak efek superkonduktivitas yang disebut dengan medan kritis,  $H_c$ .

## Klasifikasi Superkonduktor

Suatu bahan superkonduktor yang diletakkan dalam medan magnet akan mengalirkan arus pada permukaan bahannya yang pada gilirannya akan menghasilkan medan magnet pada bahan superkonduktor tersebut, akibatnya medan magnet luar dapat ditolak dikarenakan medan yang dihasilkan oleh arus permukaan tersebut.



Gambar 7.1 Penolakan medan magnet oleh bahan superkonduktor pada  $T < T_c$

Superkonduktor secara umum dibagi dalam dua kategori, yaitu superkonduktor tipe I dan superkonduktor tipe II. Superkonduktor tipe I mempunyai satu medan magnet kritis,  $H_c$  dan bahan ini secara sempurna menolak medan luar sampai batas medan kritisnya.

Superkonduktor tipe II memiliki dua medan kritis yaitu medan kritis bawah,  $H_{c1}$  dan medan kritis atas,  $H_{c2}$ . Jika medan luar yang diberikan lebih kecil dari,  $H_{c1}$  maka bahan superkonduktor ini bersifat seperti bahan superkonduktor tipe I. Jika medan luar lebih besar dari  $H_{c1}$ , sebagian medan akan berpenetrasi dalam bahan sampai  $H_{c2}$ , pada keadaan ini bahan masih menunjukkan sifat superkonduktivitas. Dan jika medan luar lebih besar dari  $H_{c2}$ , maka seluruh medan magnet akan masuk sehingga sifat superkonduktivitas akan hilang.

Superkonduktor dikatakan berada dalam keadaan campuran (mixed state) atau keadaan Schubnikov jika medan luar yang diberikan bernilai antara  $H_{c1}$  dan  $H_{c2}$ . Dalam keadaan campuran tersebut, medan yang menembus ke dalam superkonduktor membentuk fluxoid atau vorteks kuantum terkuantisasi yang besarnya ditentukan oleh tetapan planck dan muatan elektron.

$$\Phi_o = \frac{h}{2e} = 2.067 \times 10^{-15} \text{ weber} \quad (7.1)$$

Fluksoid tersebut berdiameter sebesar  $\xi$ . Dengan demikian, dalam bahan superkonduktor terdapat daerah normal yang ditembus fluksoid magnet dan daerah diantaranya tetap bersifat superkonduktif. Medan magnet induksi rerata dalam bahan ( $\mathbf{B}$ ) ditentukan oleh jumlah vorteks per luas menurut rumus

$$B = n\Phi_o \quad (7.2)$$

## Sifat Superkonduktor

### 1. Sifat Kelistrikan

Apa itu superkonduktor? Berdasarkan bahasa, *konduktor* artinya suatu bahan yang dapat menghantarkan listrik (*conduct* = hantar), dan “super” artinya luar biasa. Sehingga superkonduktor itu adalah suatu bahan yang bisa menghantarkan listrik dengan sangat hebat dan memiliki tahanan listrik nol.

Jika tahanan listrik ini nol maka arus yang dialirkan tidak akan kehilangan energi, dengan kata lain efisiensi arus menjadi sangat tinggi. Hal tersebut dapat terjadi jika suhu bahan tersebut berada di bawah suhu kritis ( $T_c$ ).

Fenomena superkonduktor ini tidak bisa dijelaskan oleh teori pita keadaan (teori ini bisa menjelaskan fenomena konduktor,

isolator dan semikonduktor), akan tetapi dapat dijelaskan oleh teori BCS. BCS singkatan dari Bardeen, Cooper, dan Schrieffer tiga orang pencetus teori tersebut pada tahun 1957 dan mendapat hadiah Nobel bidang fisika pada tahun 1972.

Teori BCS menjelaskan bahwa elektron tunggal pada bahan superkonduktor ( $T < T_c$ ) tidak dapat menghantarkan listrik melainkan harus berpasangan, yang dikenal dengan pasangan Cooper (*Cooper pairs*). Padahal dua elektron tersebut memiliki muatan yang sama maka hal ini bertentangan dengan hukum Coulomb yang mengatakan bahwa dua buah partikel dengan muatan yang sama akan saling tolak-menolak.

Alasannya, karena pada saat sebuah elektron bertumbukan dengan sebuah atom positif, hal itu menghasilkan muatan positif dengan konsentrasi kecil pada elektron. Akhirnya elektron tersebut tertarik oleh elektron lain yang bermuatan negatif sehingga membentuk pasangan Cooper. Ketidakmurnian dan kecacatan kristal membantu aliran elektron pasangan Cooper sehingga tidak memiliki hambatan (tahanan listrik = nol).

## **2. Sifat Kemagnetan**

Ketika bahan superkonduktor diberi kuat medan dari luar maka magnetisasi yang terjadi dalam bahan akan mempunyai arah yang berlawanan dengan arah kuat medan yang diberikan sehingga dikatakan bahan bersifat diamagnetik sempurna. Jika medan yang diberikan besarnya berada antara batas medan kritis bawah ( $H_{c1}$ ) dan medan kritis atas ( $H_{c2}$ ),  $H_{c1} < H < H_{c2}$  maka sebagian dari medan luar tersebut akan masuk ke dalam bahan superkonduktor yang terkuantisasi dalam bentuk tabung-tabung fluksoid yang berdiameter sekitar orde panjang

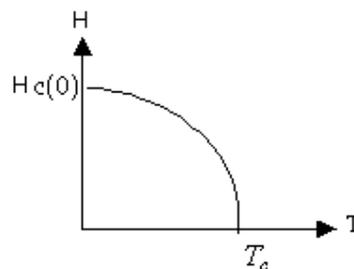
---

koherensi  $\xi$ . Dengan demikian superkonduktor berada dalam keadaan campuran (mixed state) dengan bagian yang berisi fluksoid bersifat normal dan bagian luar fluksoid akan bersifat superkonduktif.

Superkonduktor tipe I merupakan bahan diamagnetis sempurna yang tidak membenarkan flux magnet ada di bagian dalam bahan. Rapat flux dalam bahan dapat dihubungkan dengan kuat medan magnet yang diberikan melalui persamaan:

$$B = \mu_o(1 + \chi)M \quad (7.3)$$

dengan  $\mathbf{M}$  merupakan magnetisasi bahan. Di dalam bahan superkonduktor tipe I  $\mathbf{B} = 0$ , sehingga magnetisasi  $\mathbf{M} = -\mathbf{H}$  dan suseptibilitas magnet  $\chi = -1$ . Kuat medan magnet yang mengakibatkan hilangnya sifat superkonduktifitas bahan dikenal dengan medan kritis  $H_c$ . Medan kritis sebagai fungsi suhu untuk superkonduktor tipe I diperlihatkan dengan gambar berikut:



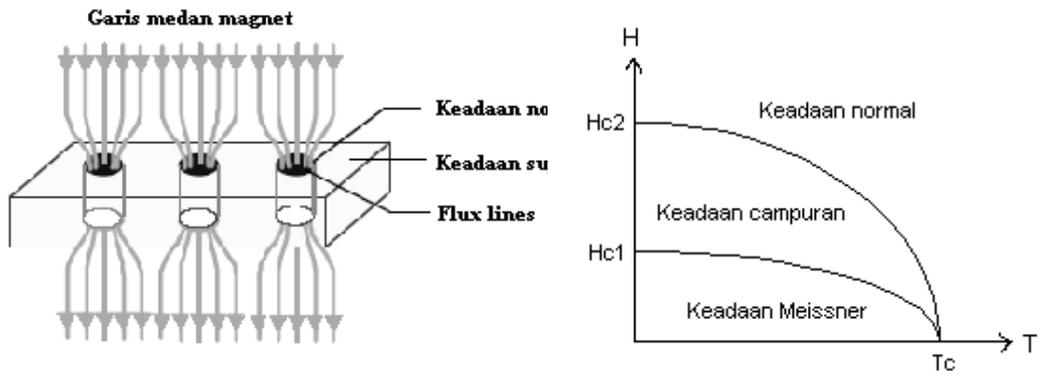
Gambar 7.2 Respon bahan superkonduktor tipe I terhadap medan magnet sebagai fungsi suhu

Dari hasil eksperimen medan kritis ini dirumuskan sebagai berikut :

$$H_c = H_c(0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (7.4)$$

dengan  $H_c(0)$  adalah medan kritis pada suhu nol mutlak.

Pada superkonduktor tipe II, transisi ke keadaan normal akibat pengaruh medan magnet akan terjadi secara perlahan. Gambar berikut memperlihatkan penetrasi parsial medan diantara medan kritis bawah ( $H_{c1}$ ) dan medan kritis atas ( $H_{c2}$ )



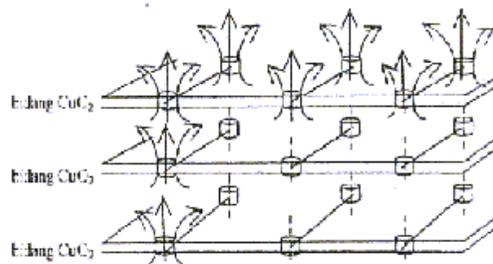
Gambar 7.3 Ciri umum diagram fase  $H$ - $T$  untuk superkonduktor tipe II

### Superkonduktor Suhu Tinggi (SKST)

Penelitian yang terus menerus dalam bidang superkonduktor pada akhirnya melahirkan superkonduktor suhu tinggi (SKST) yang menjanjikan prospek menarik bagi aplikasinya dan menghadirkan tantangan luar biasa dalam bidang ilmu untuk menguak misteri yang terkandung didalamnya.

Dalam semua sistem senyawa superkonduktor suhu tinggi yang berbasis keramik/oksida, kehadiran lapisan  $Cu-O$  (kuprat) dalam struktur kristalnya merupakan ciri utama yang sampai saat ini dipercaya sebagai lapisan yang paling berperan dalam gejala superkonduktivitas. Jumlah lapisan  $CuO_2$  ini bergantung pada stokiometri dari senyawa yang bersangkutan, dan mempengaruhi suhu kritis ( $T_c$ ) dalam bahan serta sifat fisis lainnya.

Salah satu ciri penting yang membedakan superkonduktor suhu tinggi ini dengan bahan superkonduktor konvensional adalah kehadiran fasa vorteks yang jauh lebih rumit dalam diagram  $H-T$  yang berhubungan erat dengan sifat transport dan sifat magnetik bahan bersangkutan. Ciri lain yang menonjol dari bahan superkonduktor suhu tinggi ini adalah struktur kristalnya yang berlapis, yang merupakan sumber sifat anisotropik dan efek dimensi rendah. Hal ini digambarkan dengan kehadiran struktur vorteks yang tidak lagi terdiri dari fluxoid/vorteks yang berbentuk tabung (tubular), melainkan fluks magnetik yang terkuantisasi dalam bidang dua dimensi, menyerupai bentuk *pancake*. Vorteks *pancake* ini dapat berkorelasi dengan kopling Josephson. Dalam limit korelasi kuat, vorteks *pancake* ini dapat terjalin menjadi garis vorteks atau flux line yang membentuk sistem 3-dimensi. Dalam kasus dengan korelasi antar bidang yang lemah, tumpukan vorteks tersebut lebih menyerupai sistem 2-dimensi.



Gambar 7.4 Struktur vorteks pancake dengan kopling Josephson yang kuat

Konsentrasi pembawa muatan dalam SKST umumnya juga kecil karena berasal dari dopan yang berupa atom oksigen atau atom substitusi dengan valensi yang berbeda dari atom yang disubstitusinya. Sebagai akibat ciri suhu kritis yang tinggi,  $\xi$  yang kecil dan anisotropi yang tinggi maka efek fluktuasi termal menjadi

dominan dan menjadi dari berbagai gejala baru dalam superkonduktor suhu tinggi, terutama munculnya fasa cairan vorteks yang luas. Dengan  $T_c$  yang tinggi serta rapat muatan yang rendah, bahan superkonduktor suhu tinggi memiliki  $\xi$  yang sangat kecil. Dalam teori BCS  $\xi$  dirumuskan sebagai berikut :

$$\xi_0 = 0.18 \frac{\hbar V_F}{kT_c} \quad (7.5)$$

dengan  $V_F$  adalah kecepatan Fermi,  $\hbar = h/2\pi$ ,  $T_c$  adalah suhu kritis dan  $k$  merupakan konstanta boltzman. Ini akan mengakibatkan menonjolnya efek fluktuasi termal yang diukur oleh bilangan Ginzburg  $G_i \sim (T_c/\xi^{ab}\xi^c)^2$  Dalam superkonduktor konvensional bilangan  $G_i$  dalam orde  $10^{-8}$  yang jauh lebih kecil dari superkonduktor suhu tinggi sebesar  $10^{-2}$ . Konsekuensi dari  $G_i$  yang besar adalah fenomena flux creep atau lompatan fluksoid melampaui barrier pinning pada  $J < J_c$  yang dikenal sebagai gejala *Thermally Activate Flux Flow (TAFF)*. Fenomena ini berkaitan dengan pinning yang lemah.

Superkonduktor suhu tinggi umumnya memiliki struktur kristal berlapis dengan bidang  $CuO_2$  sebagai lapisan konduksi. Superkonduktor oksida ini sangat anisotropik, dimana pembawa muatannya hanya dapat bergerak dalam bidang  $CuO_2$ . Jika coupling bidang  $CuO_2$  lemah, arus super tidak dapat mengalir melalui batas butir. Berkenaan dengan anisotropi yang sangat besar, banyak usaha yang dilakukan untuk dapat meluruskan grain (align grain).

Struktur berlapis merupakan sumber bagi efek anisotropi yang akan memperburuk gangguan termal yang dinyatakan dengan parameter anisotropi  $\varepsilon$  dan didefinisikan sebagai perbandingan antara hambatan  $\rho$  dalam arah  $c$  dengan arah  $ab$  ( $\varepsilon = \rho^c / \rho^{ab}$ ).

Mulanya superkonduktor tidak dapat diaplikasikan dengan alasan  $T_c$  nya sulit untuk dicapai. Namun sejak tahun 1986, terjadi sebuah terobosan baru di bidang superkonduktivitas. Alex Miller dan George Bednorz, peneliti di Laboratorium Riset IBM di Zurich, Switzerland, berhasil membuat keramik yang terdiri dari unsur Lanthanum, Barium, Tembaga, dan Oksigen, yang bersifat superkonduktor pada suhu tertinggi pada waktu itu, 35 K. Padahal selama ini keramik dikenal sebagai isolator.

Keramik tidak mengantarkan listrik sama sekali pada suhu ruang. Hal ini menyebabkan para peneliti pada waktu itu tidak memperhitungkan bahwa keramik dapat menjadi superkonduktor. Penemuan ini dipublikasikan di Jerman dalam jurnal *Zeitschrift for Physik*, September 1986.

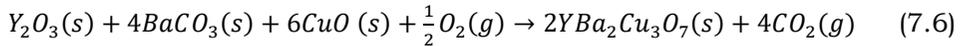
Pada tahun 1987, Paul C. W. Chu dari Universitas Houston berhasil membuat bahan superkonduktor dengan  $T_c$  93K. Bahan tersebut disusun oleh yttrium, barium, tembaga dan oksigen. Setahun kemudian Paul Chu membuat superkonduktor dengan  $T_c$  yang lebih besar, 120K. Tersusun dari unsur bismuth, stronsium, kalsium, tembaga dan oksigen. Para ahli terus berusaha meneliti berbagai material agar diperoleh superkonduktor suhu kamar. Jika hal ini berhasil tidak perlu mengeluarkan biaya untuk nitrogen cair serta mudah diaplikasikan. Secara umum, superkonduktor suhu tinggi memiliki struktur kristal perovskite.

Formula komposisi superkonduktor 1-2-3 adalah  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . Untuk  $x$  yang bernilai 0,1 maka material tersebut bersifat superkonduktor yang memiliki  $T_c=95$  K. Jika  $x=1$  akan memberikan formula  $YBa_2Cu_3O_6$  dan material ini yang bersifat isolator. Dari hal ini dapat disimpulkan bahwa fasa superkonduktor adalah senyawa yang tidak stokiometri dengan

---

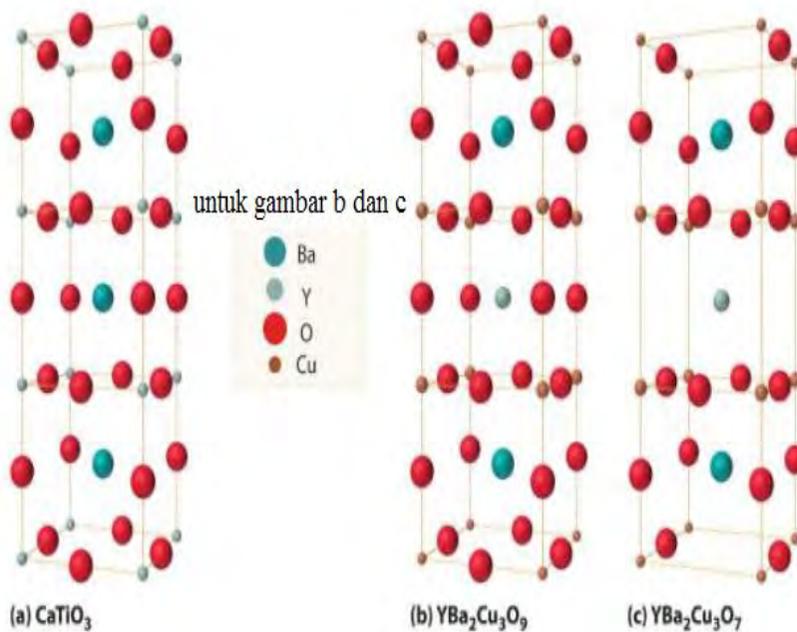
---

rasio atom logam yang tetap tetapi kandungan oksigennya bervariasi. Persamaan sintesis dari material ini direpresentasikan dalam persamaan berikut ini



Jika kita mengasumsikan fasa superkonduktivitas alam keadaan stokiometri yaitu  $YBa_2Cu_3O_7$ , maka keadaan oksidasi rata-rata dari O, Y, Ba dan Cu masing-masing adalah -2, +3, +2 dan +7/3. Cara paling sederhana untuk menghitung keadaan oksidasi rata-rata dari Cu adalah dengan mengasumsikan 2 atom Cu per satuan formula yang muncul sebagai  $Cu^{2+}$  dan  $Cu^{3+}$ . Pada  $YBa_2Cu_3O_6$  yang bersifat isolator, nilai oksidasi Cu adalah +5/3 sehingga akan ada dua  $Cu^{2+}$  dan  $Cu^{3+}$  per satuan formula.

Unit sel superkonduktor 1-2-3 merupakan struktur perovskite sederhana. Perbedaan antara keadaan superkonduktor dan isolator dari komposisi kimia Y, Ba, Cu dan O di atas adalah bahwa atom O telah hilang diantara ion Cu, yang merusak rantai dari atom Cu dan menyebabkan atom Cu berada pada pusat unit sel sebagai  $Cu^+$ . Rantai dari atom Cu sangat penting dalam pembentukan keadaan superkonduktor.



Gambar 7.5 Struktur superkonduktor Y-Ba-Cu-O dibandingkan dengan struktur perovskite sederhana (a) Tumpukan tiga unit sel dari struktur perovskite  $\text{CaTiO}_3$  dengan pusat Ca, (b) penggantian seluruh atom Ti dengan Cu, penggantian Ca pada kubus atas dan bawah dengan Ba, dan penggantian Ca pada pusat krus dengan atom Y yang memberikan rumus stokiometri  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_9$ . (c) Penghilangan dua atom oksigen per satuan sel memberikan rumus stokiometri  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ .

### Sintesis Superkonduktor

Penelitian dan pengembangan pada kelompok bahan superkonduktor diarahkan pada penguasaan proses sintesis dan karakterisasi komposit, lapisan tipis superkonduktor dan superkonduktor *bulk* sistem Tc tinggi.

Pada saat ini proses sintesis *bulk* tersebut dilakukan dengan metode reaksi padatan dan reaksi kimia basah. Dan segera diterapkan proses sintesis *bulk* dengan metode pelelehan dimana dengan proses ini diharapkan dapat diperoleh bahan superkonduktor dengan rapat arus ( $J_c$ ) tinggi sehingga memenuhi syarat untuk aplikasi industri.

Proses sintesis bahan superkonduktor dibagi menjadi dua tahapan besar. Tahap pertama adalah persiapan bahan yang meliputi proses penimbangan, penggerusan dan dilanjutkan dengan proses kalsinasi. Tahap kedua adalah proses sintering, pelelehan dan penumbuhan fasa.

Bahan yang digunakan adalah jenis keramik. Pembuatannya dengan metoda padatan, dipanaskan dalam tungku lalu digerus. Proses tersebut dapat dilanjutkan dengan proses pelelehan dan pendinginan bertahap. Setelah tahap ini selesai maka masuk ke dalam tahap terakhir yaitu proses annealing dalam atmosfer tertentu untuk mencapai tingkat kadar oksigen tertentu sesuai yang diinginkan. Oksigen dalam kristal akan memberikan nilai  $T_c$  yang tinggi.

### **Proses Pelelehan**

Walaupun sintesis sampel bahan yang ingin dicapai pada umumnya merupakan kristal atau fase dengan komposisi dan struktur khusus (kristal fasa tunggal), proses sintesis yang digunakan pada umumnya akan menghadirkan beberapa ragam fase yang lain, dan melibatkan reaksi serta peralihan antara fasa yang berbeda. Karena itu, untuk mencapai sasaran yang diinginkan diperlukan diagram fase untuk suatu sistem tertentu.

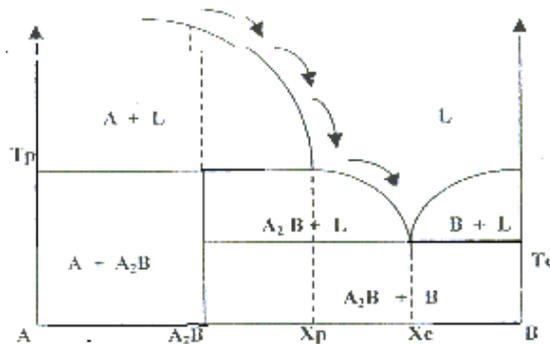
Sistem yang dimaksudkan disini ditentukan oleh komposisi kimia atau komposisi unsurnya. Fase suatu sistem selain ditentukan oleh komposisi kimianya juga ditentukan oleh strukturnya dan harus memiliki batas permukaan yang jelas serta berukuran setingkat diatas ukuran sel satuan kristal agar memiliki sifat termodinamik (sifat bulk) yang jelas seperti suhu dan tekanan.

Dari ketentuan yang diuraikan di atas, salah satu variabel yang paling penting dalam pembentukan fase tertentu adalah

---

perbandingan komponen dalam sistem. Perbandingan ini dapat diungkapkan dalam persentase berat, persentase mol atau fraksi mol.

Proses pelelehan memainkan peranan yang sangat penting pada fabrikasi superkonduktor suhu tinggi. Metode tersebut bertumpu pada proses pembekuan atau solidifikasi terkendali (*controlled solidification*) dari lelehan semisolid senyawa oksida tembaga (senyawa kuprat). Proses pembekuan tersebut memungkinkan terjadinya pertumbuhan kristal-kristal superkonduktif yang besar dan pembentukan *pinning center*. Gambar berikut merupakan proses penumbuhan kristal dengan metode *Melt Textured Growth* (MTG).

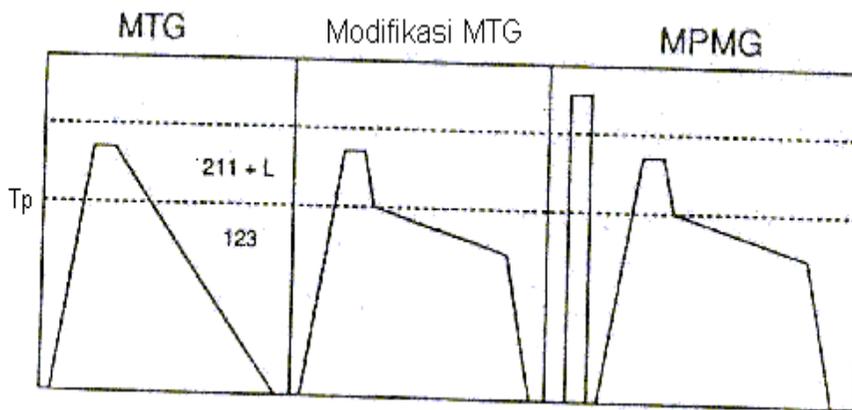


Gambar 7.6 Penumbuhan kristal dengan metode MTG

Faktor pendorong proses pertumbuhan kristal pada metode *MTG* adalah pendinginan (*cooling*). Seperti di perlihatkan pada gambar di atas. Bahan awal dengan komposisi kimia yang memenuhi stokiometri  $A_2B$  dilelehkan sampai suhu di atas  $T_p$ . Sebagai akibatnya senyawa  $A_2B$  tersebut terurai menjadi campuran padatan  $A$  dan cairannya yang jangkauan variasi komposisinya antara  $A_2B$  dan  $X_p$ . Apabila temperatur diturunkan secara perlahan-lahan sehingga terjadi proses pendinginan lambat (*slow cooling*), maka akan terbentuk campuran kristal  $A_2B$  dan cairan

dengan jangkauan variasi komposisi antara  $X_p$  dan  $X_e$  dalam jangkauan variasi suhu antara  $T_p$  dan  $T_e$ . Ini menunjukkan bahwa untuk menumbuhkan kristal tunggal  $A_2B$  maka variasi komposisi lelehan yang harus dipertahankan tetap berada antara  $X_p$  dan  $X_e$ .

Proses *melting* (pelelehan) yang sering dilakukan dalam penelitian sebelumnya meliputi *Melt Textured Growth (MTG)*, modifikasi MTG dan *Melt Powder Melt Textured Growth (MPMG)*. Berikut ini akan disajikan diagram dari ketiga proses pelelehan



Gambar 7.7. Diagram proses pemanasan MTG dan MPMG

Diagram proses pelelehan tersebut melibatkan pemanasan bahan secara cepat sampai pada suhu sedikit diatas suhu leleh dan kemudian didinginkan secara lambat. Proses seperti ini akan memungkinkan terjadinya rekristalisasi yang berjalan lambat. Rekristalisasi yang berjalan lambat akan menghasilkan butiran-butiran yang besar dengan sudut antar butir yang relatif kecil. Proses *melt textured growth (MTG)* dilakukan dengan memanaskan bahan secara cepat sampai suhu diatas suhu lelehnya dan ditahan beberapa saat agar reaksinya berlangsung sempurna sebelum kemudian didinginkan secara cepat (*quenching*) sampai suhu sedikit diatas suhu peritektik dan kemudian didinginkan secara perlahan melalui suhu peritektik sampai temperatur kamar.

Metode ini memiliki keunggulan yaitu menghasilkan grain atau butiran yang lebih homogen karena rekristalisasi yang berjalan lambat. Rekristalisasi yang berlangsung lambat akan menghasilkan butiran-butiran yang besar. Proses pelelehan (*melting process*) menghasilkan bahan dengan butiran yang besar (*coarse grained*) sehingga memperkecil *high-angle grain boundary* dan dengan demikian mengurangi efek *weak link* yang dapat memperbesar rapat arus kritis.

Proses *MPMG* merupakan variasi dari proses *MTG*. Proses *MTG* dimulai dengan memanaskan bahan secara cepat sampai suhu sedikit di atas suhu reaksi peritektik dan ditahan beberapa saat agar reaksinya berjalan sempurna. Setelah itu bahan didinginkan cepat sampai suhu di atas suhu peritektik dan untuk mendapatkan senyawa 1-2-3 dengan butir yang relatif besar dilakukan pendinginan secara lambat.

Dalam proses *MPMG* terdapat langkah tambahan yang dilakukan sebelum *MTG*. Langkah tambahan tersebut adalah memanaskan bahan secara cepat sampai suhu di atas suhu lelehnya yaitu  $+L$  dan ditahan beberapa saat sebelum kemudian didinginkan secara cepat. Bahan yang dihasilkan kemudian digerus untuk mendapatkan partikel-partikel yang halus dan tersebar merata. Bahan kemudian dikompaksi dan dipanaskan kembali menurut langkah proses *MTG*.

Selama proses pelelehan, fase superkonduktor akan mengalami dekomposisi dan akan kembali ke fase superkonduktor seiring dengan peningkatan kerapatan (densitas) melalui proses *solidification*. Proses pelelehan berguna untuk memulihkan dan memperbaiki tekstur bahan superkonduktor yang rusak selama pemrosesan secara mekanik. Proses pelelehan yang cukup lama

---

dapat berakibat sulitnya pengembalian fase superkonduktor yang mengalami dekomposisi. Untuk mengatasi hal ini Y.C Guo dkk mengusulkan pelelehan dilakukan dalam waktu singkat sehingga diharapkan pembentukan fasa dapat berlangsung lebih cepat dan disertai peningkatan  $J_c$ . Hal ini memungkinkan karena dengan proses pelelehan yang cukup singkat akan membantu pembentukan fasa yang efektif, mempertinggi rapat massa, meningkatkan kualitas penjajaran butir, memperbesar ukuran grain dan fasa impuritas menyebar secara merata.

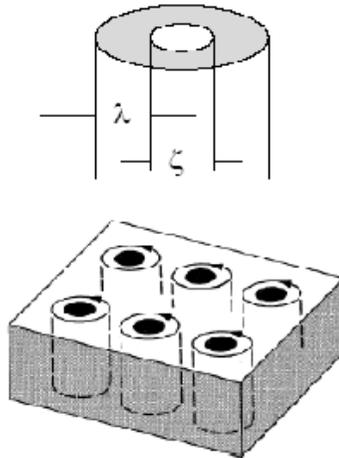
Proses berikutnya dari sintesa superkonduktor adalah sintering. Sintering merupakan *solid state reaction* (reaksi padatan) sehingga laju difusi atom tidak terlalu cukup untuk membentuk struktur yang ideal yang pada gilirannya dapat menimbulkan cacat (defect) dalam grain boundaries. Sintering biasa digunakan dan mempunyai kelebihan dalam pemrosesan keramik, diantaranya adalah peningkatan kerapatan (density) dalam bahan. Pada kenyataannya dengan sintering kurang berhasil untuk memproduksi superkonduktor oksida dengan nilai  $J_c$  yang besar, yang diakibatkan oleh munculnya weak-link dalam grain boundaries (batas butir) [murakami]. Weak-link dalam batas butir ini sebagian berasal dari impuritas, variasi kimia atau struktural, kehadiran fasa nonsuperkonduktif dan keretakan.

### **Gaya Lorentz dan Kekuatan Pinning**

Superkonduktor tipe II dapat mempertahankan keadaan superkonduktifnya sampai  $H_{c2}$ , dengan membendung medan magnet yang menerobos masuk dalam bentuk fluksoid yang terkuantisasi dan terperangkap dalam tabung atau filamen yang berdiameter  $\xi$ . Daerah diantara tabung fluksoid yang bebas dari medan magnet tetap bersifat diamagnetis sempurna. Tetapi

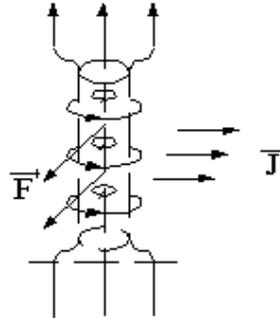
---

keadaan sesungguhnya tidak sederhana itu, superkonduktivitas tidak akan terjamin dengan sendirinya diantara daerah vorteks walaupun vorteks terlokalisasi dalam kolom-kolom yang tersusun teratur.



Gambar 7.8. Medan magnet yang berpenetrasi tekuantisasi dalam bentuk vorteks

Dengan hadirnya fluksoid dalam superkonduktor tipe II akan menyebabkan pengaruh sangat besar terhadap rapat arus kritis. Bila arus dialirkan sepanjang superkonduktor tipe II maka arus super akan mengalir pada daerah superkonduktif bukan pada daerah yang diterobos medan magnet. Akibat adanya fluks magnetik dan arus listrik maka akan terjadi interaksi antara keduanya. Interaksi ini akan menimbulkan gaya Lorentz  $F_L = J \times B$  yang menyebabkan gerakan fluksoid, dan berdasarkan hukum Faraday, gerakan fluksoid itu akan menimbulkan medan listrik  $\mathbf{E}$  jika tidak ada penghalang (barrier), yaitu bila superkonduktor dalam keadaan tanpa cacat. Bergeraknya fluksoid mengakibatkan bahan menjadi bersifat disipatif (Resistif).



Gambar 7.9. Ilustrasi pergerakan vorteks akibat arus listrik  $J$  dalam bahan superkonduktor.

Untuk menghilangkan efek disipasi, kenyataannya diperlukan pencegahan gerakan fluksoid dengan memberikan pusat pinning (penahan) yang berupa cacat atau impuritas sehingga rapat arus yang tinggi dapat dicapai.

Dalam superkonduktor yang tidak murni (terdapat cacat) fluksoid akan berinteraksi dengan cacat kristal atau impuritas yang akan memberikan gaya pinning bagi vorteks yang akan bergerak. Gaya pinning ini menentukan batas maksimum rapat arus kritis  $J_c$  yang dapat mengalir dalam bahan pada medan luar tertentu tanpa menimbulkan efek disipasi. Dengan kata lain kehadiran impuritas atau cacat yang pada umumnya akan menimbulkan barrier energi. Dengan demikian pergerakan fluksoid akan tertahan oleh jebakan yang berfungsi sebagai pusat pinning fluksoid. Gaya pinning ditentukan oleh besarnya *barrier energy* tersebut serta karakteristik elastis fluksoid dan efek fluktuasi termal. Barrier energi ini dikenal sebagai energi pinning (pinning energy)  $U_o$  oleh Anderson-Kim dirumuskan sebagai berikut

$$U_o = \frac{\beta_o H_c^2 \xi \phi_o}{H} \quad (7.7)$$

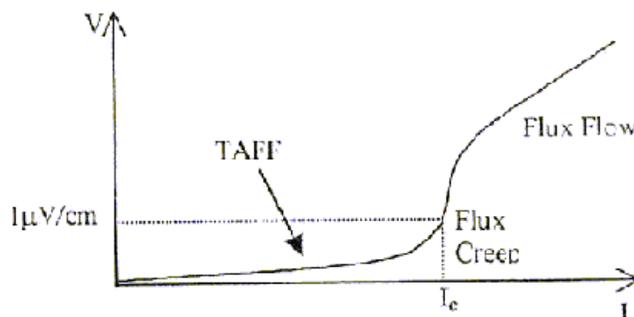
dengan  $H_c$  menyatakan medan kritis termodinamik,  $\xi$  panjang koherensi,  $\phi_o$  fluks kuantum satuan dan  $\beta_o$  suatu tetapan.

Untuk memahami pentingnya peranan pinning dalam superkonduktor tipe II, telah banyak dilakukan penelitian dalam bentuk kristal tunggal. Idealnya dalam bahan tersebut tidak terdapat pusat pinning yang menghambat gerakan fluksoid, jika ada hanya berupa pinning yang lemah. Maka dari itu kristal tunggal konvensional dengan kualitas tinggi bila diberi arus akan mengalami disipasi.

Gaya Lorentz akan bekerja secara tegak lurus terhadap fluksoid sehingga menyebabkan terjadinya gerakan fluksoid. Fluksoid yang terikat oleh pusat pinning dapat mengakibatkan distorsi kisi.

Gerakan fluksoid hanya mungkin jika gaya Lorentz ( $F_L$ ) jauh lebih besar dari gaya pinning ( $F_p$ ), sehingga rapat arus akan bersifat nondisipatif jika  $J < J_c$ . Akan tetapi jika  $J > J_c$ , maka fluksoid akan bergerak dengan kecepatan  $v$  dan menimbulkan medan listrik  $E$ .

Pada suhu yang mendekati  $T_c$ , terdapat kemungkinan fluksoid yang terikat oleh pinning center dapat melompat melampaui gaya pinning, sehingga walaupun pada  $J < J_c$  dapat terjadi gerakan fluksoid yang berarti bahan menjadi resistif. Gejala ini dinamakan flux creep. Gejala flux creep terjadi pada arus cukup besar yaitu mendekati arus kritisnya. Hubungan tegangan terhadap arus pada daerah ini tidak lagi bersifat ohmik.



Gambar 7.10. Karakteristik tegangan-arus dalam Superkonduktor Suhu Tinggi

Pusat pinning (pinning center) terbagi menjadi dua jenis yaitu instrinsik dan ekstrinsik. Instrinsik meliputi cacat kristal

sedangkan ekstrinsik meliputi batas butir, dislokasi dan precipitate. Sumber efek pinning yang berupa cacat kristal terdiri dari cacat titik (point defect) dan cacat garis (line defect). Cacat titik meliputi cacat kekosongan (vacancies) dan cacat innerstitial sedangkan cacat garis meliputi dislokasi atau ketidakhomogenan bahan yang berkaitan dengan kehadiran keretakan, batas butir dan lain-lain.

Bahan superkonduktor keramik pada umumnya mengandung banyak cacat. Cacat tersebut sangat bergantung pada kondisi pemrosesan yang dilakukan selama pabrikasinya.

Dalam kerangka teori kuantum makroskopik telah dibuktikan bahwa fluks yang dibendung dalam tabung tersebut terkuantisasi dalam satuan kuantum fluksoid  $\phi_o = \frac{h}{2e} = 2 \times 10^{15} \text{ weber}$ . Dan akibat kehadiran fluksoid akan menimbulkan gaya lorentz yang menyebabkan fluksoid bergerak sehingga bahan bersifat disipatif (resistif). Jika medan yang diberikan lebih kecil dari  $H_{c1}$  medan secara sempurna akan ditolak oleh bahan (efek meissner) sedangkan jika medan lebih besar dari  $H_{c2}$  sifat superkonduktivitas bahan akan hilang.

Dalam superkonduktor suhu tinggi kombinasi temperatur operasi yang tinggi, pendeknya panjang koherensi ( $\xi$ ) serta anisotropi yang cukup besar akan menyebabkan fluktuasi fluksoid. Efek yang timbul dari fluktuasi fluksoid ini adalah munculnya vortex-liquid-phase dalam diagram fasa  $H$ - $T$ . Akibatnya dibutuhkan penahan (pinning) untuk dapat mencegah pergerakan fluksoid tersebut yang pada gilirannya dapat mengeliminasi efek disipatif.

Fluks pinning di dalam bahan superkonduktor tipe II berasal dari interaksi antar cacat dalam bahan dengan garis-garis fluks. Di dalam sebuah bahan superkonduktor yang ideal, energi bebas dari

---

sebuah garis fluks individual tidak bergantung pada posisi spasialnya. Garis-garis fluks terdistribusi secara homogen di dalam bahan, dan membentuk kisi *triangular Abrikosov*. Cacat di dalam bahan superkonduktor dapat menyebabkan perubahan dari situasi lokal sehingga menyebabkan variasi dari energi bebas dari garis-garis fluks. Variasi negatif dari energi bebas dapat menyebabkan garis-garis fluks berada di sekitar kedudukan cacat tersebut dan dalam hal ini cacat berlaku sebagai pusat-pusat pinning yang dapat mencegah gerak dari garis-garis fluks.

Analisis mikroskopik dari mekanisme fluks pinning memerlukan pengetahuan atau informasi mengenai interaksi elemental antara garis fluks dan ketidakhomogenan dalam bahan, dimana interaksi elemental ini harus dijumlahkan meliputi seluruh distribusi spasial dari pusat-pusat pinning, dengan memperhitungkan sifat elastik dan sifat plastik dari kisi garis fluks. Hasil dari kerapatan gaya pinning makroskopik  $F_p$ , berhubungan dengan rapat arus kritis  $J_c$ , yaitu  $F_p = J_c B$ , dimana B adalah medan luar yang diberikan ke dalam bahan.

Interaksi antara sebuah garis fluks dan inhomogenitas di dalam bahan umumnya dihubungkan dengan variasi dari parameter order di dalam daerah inhomogenitas tersebut. Pinning yang disebabkan oleh cacat di dalam bahan antara lain adalah dislokasi, cacat titik (point defect), kekosongan (void), batas grain, batas twinning dan precipitate.

Ketika sebuah bahan superkonduktor tipe II berada dalam medan magnet luar  $H$  yang bernilai lebih besar dari medan kritis bawahnya,  $H_{c1}(T)$ , garis-garis fluks atau tabung-tabung fluksoid akan masuk dan mengalami penetrasi ke bagian permukaan luar dari bahan. Garis-garis fluks yang masuk ke dalam bahan tersebut

---

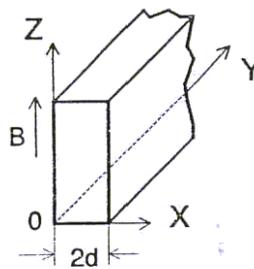
dapat mengalami trapping di daerah pusat-pusat pinning, sehingga menyebabkan distribusi garis-garis fluks tersebut menjadi tidak homogen. Gradien dari kerapatan garis-garis fluks antara bagian permukaan dan bagian dalam dari bahan dapat menimbulkan gaya atau tekanan penggerak yang mendorong garis-garis fluks tersebut menuju pusat bahan. Tekanan ini pada dasarnya berasal dari gaya lorentz  $F_L = J \times B$  dan menurut persamaan Maxwell arus dalam sampel dirumuskan

$$J = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times B \quad (7.8)$$

dan arah gerak garis fluks yang ditimbulkan adalah menuju kerapatan garis fluks yang lebih rendah. Ketika gaya lorentz  $F_L$  bernilai sama dengan rapat gaya pinning,  $F_p$  di dalam seluruh bagian bahan, gerak garis-garis fluks akan terhenti dan distribusi garis-garis fluks akan bernilai konstan. Dalam keadaan ini dikatakan garis fluks mencapai keadaan setimbang (model kritis Bean) dan arus kritis di dalam bahan menacapai nilai maksimumnya  $J_c$ .

Distribusi medan dan arus super di dalam bahan dalam keadaan kesetimbangan dapat ditentukan dari model keadaan kritis Bean yang akan diuraikan sebagai berikut Untuk sebuah sampel berbentuk plat/slab dengan ketebalan  $2d$  dalam arah sumbu  $x$ , medan magnet diberikan sepanjang arah sumbu  $z$  dan sampel diasumsikan tidak mempunyai dimensi yang terbatas dalam arah sumbu  $y$  seperti ditunjukkan oleh gambar berikut, distribusi medan di dalam bahan dapat dianggap hanya merupakan fungsi dari  $x$ , rapat arus kritis sepanjang sumbu  $y$ , dimana besarnya rapat arus kritis dapat ditentukan dari rumusan

$$J_c(x) = -\frac{1}{\mu_0} \frac{dB(x)}{dx} \quad (7.9)$$



Gambar 7.11. Superkonduktor Berbentuk Slab dalam Medan magnet  
 Nilai  $J_c$  biasanya bergantung pada pinning center dalam sampel dan akan menurun terhadap peningkatan suhu  $T$  dan medan magnet,  $B$ . tetapi dalam model kritis Bean ini diasumsikan  $J_c(T)$  tidak bergantung pada besarnya nilai medan magnet di dalam bahan.

### Rapat Arus Kritis

Setiap fluksoid yang menerobos dalam bahan superkonduktor tipe II (mixed state) selalu dibendung oleh arus perisai yang mengelilinginya dengan demikian terjadi lokalisasi fluksoid. Arus yang mengalir dalam bahan superkonduktor akan menimbulkan gaya Lorentz yang dapat menggerakkan fluksoid. Karena itu gerak fluksoid perlu dicegah dengan kehadiran pinning.

Jika gaya Lorentz sama dengan gaya pinning, maka rapat arus tersebut disebut rapat arus kritis ( $J_c$ ) sehingga akan memenuhi hubungan  $F_p = J_c \times B$ . Untuk peningkatan rapat arus kritis dibutuhkan efek pinning yang kuat agar gerak fluksoid dapat dicegah. Dengan demikian bahan yang bersangkutan akan menghalangi proses keluar masuknya fluksoid.

Untuk kepentingan aplikasi yang ekonomis diperlukan  $J_c > 10^5$  A/cm<sup>2</sup>. Rapat arus kritis dapat dipadang sebagai batas antara transport listrik yang bersifat nondisipatif dan yang bersifat

disipatif, mengingat bahwa timbulnya keadaan disipatif berkaitan dengan pemunculan tegangan listrik pada superkonduktor yang dialiri arus listrik yang lebih besar dari  $J_c$ .

Untuk bahan superkonduktor suhu tinggi pada umumnya mempunyai rapat arus kritis yang rendah. Rapat arus kritis yang rendah ini antara lain disebabkan oleh ukuran butiran dan karakteristik sambungan pada batas antar grain yang disambungkan oleh hubungan lemah (*weak link*), dan juga adanya gerak fluks magnet dalam fasa shubnikon atau fasa campuran superkonduktor. Dalam superkonduktor tipe II ideal rapat arus kritisnya sangat kecil sebab fluxoid dapat bergerak bebas. Tapi pada kenyataannya superkonduktor tipe II ini selalu mempunyai cacat atau impuritas yang berfungsi sebagai penahan gerak fluxoid. Semakin kuat sifat penahan fluxoid (flux-pinning) semakin tinggi rapat arus kritis yang dapat dialirkan dan superkonduktor ini dinamakan *hard superconductor*. Apabila fluxoid dapat meninggalkan penahan dan bergerak dalam kisi kristal, maka transport listrik tersebut akan menimbulkan disipasi energi dan bahan tidak lagi berfungsi sebagai superkonduktor.

Parameter penting yang berkaitan dengan pusat pinning adalah panjang koherensi  $\xi$  yang dalam superkonduktor suhu tinggi cukup kecil (0,3 – 3 nm) jika dibandingkan dengan superkonduktor konvensional seperti Nb (40 nm) dan Pb (500 nm). Untuk fluks pinning optimal, ukuran pinning dalam orde panjang koherensi. Berkenaan dengan panjang koherensi yang sangat pendek dalam superkonduktor suhu tinggi harus diperhatikan bahwa pusat pinning dalam ukuran sebesar itu dapat menjadi barrier/penghalang pada batas butir. Akibatnya dapat mengubah batas butir dari jenis hubungan kuat (*strong link*) menjadi jenis

---

hubungan lemah lemah (*weak link*). Hal ini akan menyebabkan turunnya rapat arus kritis.

Untuk aplikasi superkonduktor seperti pada kawat atau pita komposit, rapat arus kritis memegang peranan yang sangat penting seperti yang telah diuraikan sebelumnya, penurunan nilai  $J_c$  salah satunya disebabkan oleh weak link yang bersumber dari batas butir dan misorientasi butir. Jadi nyata bahwa permasalahan  $J_c$  untuk bahan superkonduktor suhu tinggi berkaitan dengan masalah grain (butir). Peningkatan  $J_c$  berarti peningkatan rapat massa bahan, penjajaran butir (grain alignment) dan kemurnian fase. Peningkatan rapat massa berarti pengurangan tingkat porositas bahan sehingga meningkatkan kontak antar butir, sedangkan kemurnian fase berkaitan dengan kehomogenan bahan yang akan mempengaruhi aliran arus dalam bahan.

Pengukuran arus kritis secara langsung dapat dilakukan dengan memberikan arus yang besarnya terus meningkat melalui bahan superkonduktor sampai terdeteksi nilai tegangan tertentu, dan untuk superkonduktor konvensional sebesar  $1\mu\text{V}/\text{cm}$ . Kriteria ini juga digunakan untuk superkonduktor oksida. Tetapi cara ini kurang efektif akibat panas yang ditimbulkan pada saat kontak. Berbeda dengan film tipis untuk bulk superkonduktor, diperlukan arus yang besar untuk mengukur nilai  $J_c$ . Sebagai contoh, dibutuhkan arus 100A dalam sampel dengan luas penampang  $1 \times 1 \text{mm}^2$  untuk mengukur  $J_c$   $10^4 \text{ A}/\text{cm}^2$ . Arus ini akan menimbulkan gaya Lorentz yang begitu besar dan menyebabkan kerusakan pada sampel.

Untuk menghindari kerusakan akibat pengukuran rapat arus secara langsung, maka dicari solusi lain dan salah satunya adalah

pengukuran magnetisasi sebagai metode tidak langsung untuk menentukan rapat arus kritis.

Jika gaya Lorentz besarnya sama dengan gaya Pining, maka rapat arus yang mengalir disebut rapat arus kritis. Untuk menghasilkan rapat arus kritis yang besar diperlukan efek pining yang kuat agar gerak vorteks dapat dicegah. Dengan demikian bahan superkonduktor akan menghalangi proses Bergeraknya vorteks. Ini berarti proses magnetisasi akan memperlihatkan efek histeresis yang bersesuaian dengan kekuatan pining tersebut. Artinya nilai rapat arus yang besar berkaitan dengan efek histeresis yang besar juga. Hubungan ini dapat dimanfaatkan untuk menentukan rapat arus kritis berdasarkan efek histeresis dari kurva magnetisasi. Dan berdasarkan model keadaan kritis Bean, rapat arus dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$J_c = \frac{2\Delta M}{d} \quad (7.10)$$

dengan  $d$  adalah ketebalan sampel dan  $\Delta M$  adalah selisih magnetisasi up dan down.

Arus kritis dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

### 1. Arus Depairing ( $J_d$ )

$J_d$  adalah arus kritis (minimum) yang akan merusak pasangan elektron. Ini berkaitan dengan energi kinetik yang ditimbulkan oleh arus listrik berdasarkan hubungan

$$J = n_s q_s V_s \quad (7.11)$$

atau energi kinetik elektron

$$\varepsilon_k = \left( \frac{1}{2} m_s V_s^2 \right) n_s = \frac{1}{2} \frac{m_s}{n_s q_s^2} J^2 = \frac{1}{2} \mu_o \lambda^2 J^2 \quad (7.12)$$

$$\text{dengan } \lambda^2 = \frac{m_s}{\mu_o n_s q_s^2}$$

energi magnetik yang diperlukan untuk merusak superkonduktivitas adalah

$$\frac{1}{2}\mu_0 H_c^2 \quad (7.13)$$

maka arus depairing dapat ditentukan dari persamaan berikut ini

$$\frac{1}{2}\mu_0 \lambda^2 J_d^2 = \frac{1}{2}\mu_0 H_c^2 \quad (7.14)$$

sehingga diperoleh  $J_d = \frac{H_c}{\lambda}$

penurunan lebih teliti berdasarkan model Ginzburg-Landau yang akan menghasilkan perumusan yang sama yang hanya berbeda pada konstanta proposional

$$J_{d,GL} = \frac{\phi_0}{3(3)^{\frac{1}{2}}\pi\mu_0\lambda^2\xi} = \frac{2(2)^{\frac{1}{2}}H_c}{3(3)^{\frac{1}{2}}\lambda} \quad (7.15)$$

## 2. Arus Kritis Intragrain

Dalam superkonduktivitas tipe I, yang ditemukan oleh K.Onnes, rapat arus yang dialirkan melaluinya terbatas oleh suatu nilai maksimum yang kini dikenal sebagai rapat arus kritis  $J_c$ . Jika batas ini dilampaui, maka supekonduktivitas beralih menjadi konduktor normal. Batasan ini sebagai batasan medan  $H$  bagi superkonduktor yang dikenal sebagai medan kritis,  $H_c$ . Jika  $l$  adalah dimensi batang superkonduktor dalam arah tegak lurus arah  $J_c$  dan  $H$ , maka rapat arus kritis

$$J \propto \frac{H_c}{l} \quad (7.16)$$

### **Flux Flow dan Flux Creep**

Ketika bahan superkonduktor tipe II dalam keadaan campuran (mixed state) dan arus transport  $J$  mengalir dalam bahan superkonduktor. Gaya lorentz untuk sebuah fluksoid dinyatakan

dalam  $f_L = J \times \phi_o$  sehingga kerapatan gaya lorentz dirumuskan  $F_L = J \times B$ , dengan  $B = n\phi_o$ , dimana  $n$  adalah jumlah fluksoid. Jika gaya lorentz lebih besar dari gaya pinning  $F_p$ , fluksoid akan bergerak searah dengan gaya lorentz dengan kecepatan  $v$ . Medan listrik  $E$ , yang dihasilkan oleh gerak fluksoid dirumuskan dengan  $E = B \times v$ .

Untuk kasus flux flow yang ideal yaitu tidak ada pinning dan gerak fluksoid hanya dihambat oleh efek viskositas dengan gaya viskositas setiap fluxoid dirumuskan dengan  $-\eta v$  dimana  $\eta$  adalah koefisien viskositas. Jika arus transport dan medan magnet saling tegak lurus, kesetimbangan antara gaya lorentz dan gaya viskositas akan menghasilkan rumusan

$$f_L = J\phi_o = \eta v \quad (7.17)$$

dan

$$E = Bv = \frac{JB\phi_o}{\eta} \quad (7.18)$$

resistivitas akibat flux flow dirumuskan dengan

$$\rho_{flow} = \frac{E}{J} = B \frac{\phi_o}{\eta} \quad (7.19)$$

dari persamaan (19) dapat disimpulkan bahwa resistivitas akibat flux flow sebanding dengan medan, semakin besar medan yang diberikan maka resistivitas juga akan membesar. Laju disipasi energi yang timbul akibat pergerakan fluksoid dirumuskan dengan

$$W = f_L v = \eta v^2 \quad (7.20)$$

Untuk menentukan perumusan  $\eta$  hal pertama yang harus dilakukan adalah mendapatkan hubungan antara energi disipasi  $W$  dengan kecepatan  $v$ .

Bardeen dan Stephen (1965) mengasumsikan bahwa disipasi energi ini berasal dari inti fluksoid yang bergerak. Inti fluksoid

dengan radius  $\xi$  merupakan daerah normal sehingga dapat diasumsikan bahwa daerah di luar inti ( $r > \xi$ ) merupakan daerah superkonduktif sedangkan daerah di dalam inti ( $r < \xi$ ) merupakan daerah normal. Perumusan medan listrik berdasarkan teori *London* dinyatakan dengan

$$E(r) = \frac{\partial(AJ_s)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{m^* v_s}{2e} \right] \quad (7.21)$$

dimana  $v_s$  adalah kecepatan gerak fluksoid dan berdasarkan teori *Ginzburg-Landau* dirumuskan dengan  $v_s = \frac{\hbar}{m^* r}$  sehingga persamaan (21) dapat dirumuskan kembali

$$\begin{aligned} E(r) &= \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{m^* v_s}{2e} \right] = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\hbar}{2e r} \right] \\ &= -v \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{\hbar}{2e r} \right] = \frac{v \hbar}{2e r^2} \end{aligned} \quad (7.22)$$

dan untuk  $r = \xi$  maka medan listrik di dalam inti dapat dirumuskan dengan

$$E = \frac{v \hbar}{2e \xi^2} = \frac{v \phi_o}{2\pi \xi^2} \quad (7.23)$$

dimana  $\phi_o = \frac{h}{2e}$  merupakan fluks kuantum. Dengan menggunakan hukum ohm untuk daerah inti, laju disipasi energi dapat dirumuskan dengan

$$W = \pi \xi^2 \sigma_n E^2 = \frac{v^2 \phi_o^2}{4\pi \xi^2 \rho_n} \quad (7.24)$$

Dengan asumsi walaupun perubahan diskontinuitas terjadi dari keadaan normal ke keadaan superkonduktif pada  $r=\xi$ , di luar daerah inti ( $r > \xi$ ) juga ada penambahan disipasi energi dan besarnya disipasi energi tersebut sama seperti di dalam inti. Sehingga total disipasi energi akibat inti yang bergerak diperoleh dengan mengalikan persamaan (24) dengan 2 sehingga diperoleh rumusan

$$W = \pi \xi^2 \sigma_n E^2 = \frac{v^2 \phi_o^2}{2\pi \xi^2 \rho_n} = \frac{v^2 B_{c2} \phi_o}{\rho_n} \quad (7.25)$$

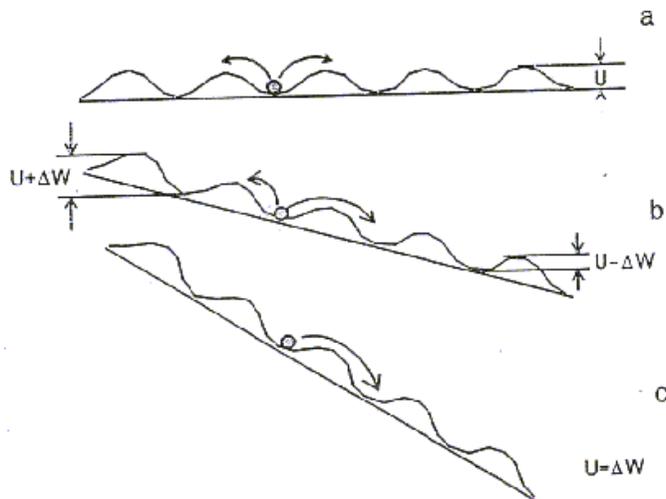
dimana  $B_{c2} = \frac{\phi_o}{2\pi \xi^2}$  adalah medan kritis atas. Dari persamaan (24) dan (20) maka diperoleh

$$\eta = \phi_o \frac{B_{c2}}{\rho_n} \quad (7.26)$$

kemudian resistivitas akibat flux flow dirumuskan dengan

$$\rho_{flow} = \rho_n \frac{B}{B_{c2}} \quad (7.27)$$

Dalam kondisi gaya lorentz lebih besar dari gaya pinning, fluksoid tidak bergerak akibat adanya pinning center. Pada suhu tertentu akibat aktivasi termal, fluksoid kemungkinan dapat bergerak keluar dari pinning center meskipun gaya penggerak lebih kecil dari gaya pinning. Fenomena ini disebut flux creep dan diprediksi kemungkinannya oleh Anderson (1962) untuk superkonduktor konvensional dan baru-baru ini diselidiki untuk superkonduktor suhu tinggi.



Gambar 7.12 partikel dalam Sumur Potensial; (a) Tanpa ada tekanan (stress), (b)  $\Delta W < U$ , creep dan (c)  $\Delta W \geq U$

Dari gambar (7.12) secara umum diasumsikan bahwa keseluruhan sumur potensial memiliki kedalaman  $U$ . Energi  $U$  adalah selisih energi untuk berada dalam sumur potensial dan untuk keluar dari sumur potensial tersebut. Pada suhu  $T$  dan tanpa adanya tekanan (stress), partikel yang terperangkap dalam sumur dapat melompat dari sumur oleh karena adanya aktivasi termal dengan probabilitas  $R$  yang dirumuskan sebagai berikut

$$R = f_0 \exp \exp \left( \frac{-U}{kT} \right) \quad (7.28)$$

dimana  $f_0$  adalah frekuensi partikel, untuk proses difusi atom besarnya frekuensi ini dalam order vibrasi atom yaitu sekitar  $10^{13}$  detik, sedangkan untuk kasus flux line besarnya  $f_0$  berkisar antara  $10^6$  dan  $10^{11}$  detik. Dari gambar 7.12a tanpa adanya tekanan, kemungkinan untuk melompat ke depan dan ke belakang sama dan tidak ada selisih pergerakannya. Ketika diberi tekanan, seperti yang dilukiskan gambar 7.12b, partikel lebih mudah melompat sepanjang arah tekanan (dalam hal ini arah ke depan) dengan probabilitas

$$R_{forw} = f_0 \exp \exp \left[ -\frac{(U-\Delta W)}{kT} \right] \quad (7.29)$$

dimana  $\Delta W$  adalah usaha yang dilakukan oleh stress (tekanan). Kemungkinan partikel untuk dapat melompat ke arah yang berlawanan (arah ke belakang) dirumuskan dengan

$$R_{back} = f_0 \exp \exp \left[ \frac{-(U+\Delta W)}{kT} \right] \quad (7.30)$$

sehingga kemungkinan bersih untuk dapat melompat ke depan adalah

$$R_{net} = R_{forw} - R_{back} = 2f_0 \exp \exp \left( \frac{-U}{kT} \right) \sinh \sinh \left( \frac{\Delta W}{kT} \right) \quad (7.31)$$

dari persamaan (31) ada dua kondisi yang mungkin dapat terjadi, yang pertama adalah untuk  $\Delta W \gg kT$ , yaitu keadaan dimana tekanan (stress) yang diberikan sangat besar dan/atau pada suhu rendah. Untuk keadaan ini efek aktivasi termal relatif lemah dan persamaan (31) menjadi

$$R_{net} = f_0 \exp \exp \left[ \frac{(\Delta W - U)}{kT} \right] \quad (7.32)$$

kemungkinan yang kedua adalah untuk  $\Delta W \ll kT$ , yaitu kondisi dimana stress (tekanan) kecil dan/atau pada suhu yang tinggi, yang berkenaan dengan aktivasi termal yang kuat dan persamaan (31) menjadi

$$R_{net} = 2f_0 \left( \frac{\Delta W}{kT} \right) \exp \exp \left( \frac{-U}{kT} \right) \quad (7.33)$$

Dari kedua kemungkinan di atas, kondisi yang diharapkan untuk dapat terus memerangkap partikel adalah  $\Delta W < U$  karena untuk  $\Delta W \geq U$  seperti yang diperlihatkan gambar 7.12c, partikel dapat dengan mudah bergerak ke luar dari sumur potensial.

Konsep yang telah diuraikan di atas dapat diterapkan untuk bahan superkonduktor dalam keadaan campuran (mixed state). Sumur potensial dapat diasumsikan sebagai efek kolektif pinning center dengan potensial pinning  $U_p$  sebagai fungsi medan magnet dan suhu. Tekanan (strees) oleh gaya Lorentz pada flux line dapat disebabkan oleh arus transport atau gradient flux line dalam bahan superkonduktor. Usaha akibat gaya Lorentz dirumuskan sebagai berikut

$$\Delta W = F_L V_a r_p \quad (7.34)$$

dimana  $F_L$  adalah rapat gaya Lorentz. Rapat gaya Lorentz dapat dirumuskan dalam pernyataan arus transport sebagai  $F_L = J \times B$  dan

$F_L = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times B) \times B$  dalam pernyataan gradien rapat flux line.  $V_a$  adalah volume aktifasi dan  $r_p$  adalah range efektif pinning center.

Penentuan  $V_a$  dan  $r_p$  bergantung pada ukuran dan kerapatan cacat serta sifat elastis flux line. Jika dimensi cacat yang searah dengan gaya Lorentz lebih besar dari panjang koherensi  $\xi$ , dimensi  $r_p$  berkisar seperti dimensi cacat. Jika dimensi cacat lebih kecil dari  $\xi$ , maka  $r_p = \xi$  untuk dapat mengisolasi fluksoid ( $B/B_{c2} < 0.2$ ) dan  $r_p = a_o/2$  untuk fluksoid yang overlapping ( $B/B_{c2} > 0.2$ ), dengan  $a_o$  adalah konstanta *FLL (Flux Line Lattice)*. Untuk kondisi rapat cacat yang rendah [ $d = \left(\frac{1}{N_p}\right)^{\frac{1}{3}} > a_o$ , dimana  $d$  adalah jarak antar cacat dan  $N_p$  adalah konsentrasi cacat] dan  $V_a \approx 1/N_p$ . Volume ini dapat terdiri dari beberapa flux line yang bergerak secara kolektif dan ini diasumsikan oleh Anderson sebagai *flux bundle*. Untuk rapat cacat yang tinggi ( $d < a_o$ ),  $V_a$  dapat dirumuskan sebagai  $V_a a_o^2 L_c$ , dimana  $L_c$  adalah panjang korelasi flux line yang bergantung pada sifat elastis flux line dan distribusi cacat.

Untuk pengukuran resistivitas, arus transport biasanya kecil, suhu tinggi (mendekati  $T_c$ ) dan persamaan (33) dapat digunakan. Substitusi persamaan (34) ke persamaan (33), kecepatan flux line yang bergerak ke depan adalah

$$v = l_h R_{net} = \frac{2l_h J B V_a r_p}{kT} \exp \exp \frac{-U_p}{kT} \tag{7.35}$$

dimana  $J$  dan  $B$  saling tegak lurus dan  $l_h$  adalah jarak lompatan fluksoid. Untuk rapat cacat yang rendah ( $d > a_o$ ),  $l_h$  bernilai sekitar  $a_o$  dan untuk rapat cacat yang tinggi,  $l_h$  bernilai sekitar  $r_p$ . Medan listrik yang dihasilkan oleh gerak flux line adalah  $E = vB$ , resistivitas akibat flux creep dirumuskan sebagai

$$\rho_{creep} = \frac{E}{J} = \frac{2f_0 l_h B^2 v_{ar_p}}{kT} \exp \exp \frac{-U}{kT} \quad (7.36)$$

### Efek Pinning

Gerak vorteks bersifat teratur karena pengaruh gaya Lorentz dan ini disebabkan karena adanya gaya penghalang gerak vorteks yang mengimbangi gaya Lorentz tersebut. Kehadiran gaya penghalang (pinning)  $F_p$  ini menentukan batas maksimum rapat arus/rapat arus kritis  $J_c$  yang dapat dialirkan dalam bahan superkonduktor pada medan  $H$  tertentu tanpa efek disipasi, sehingga gaya pinning dirumuskan sebagai berikut

$$F_p = J_p B \quad (7.37)$$

Sumber efek pinning dapat berupa cacat kristal yang terdiri dari

- Cacat titik (point defect)
- Cacat garis (line defect)
- Inhomogenitas bahan yang berkaitan dengan kehadiran permukaan pembatas, batas butir dan sebagainya.

Setiap fluksoid yang menerobos dalam superkonduktor tipe II akan terkuantisasi. Jika arus mengalir dalam bahan superkonduktor akan menimbulkan gaya Lorentz pada sistem vorteks yang bergantung pada rapat arus  $J$ . sebagai akibatnya vorteks dalam keadaan bebas bergerak dan menimbulkan medan listrik  $E$  yang searah dengan rapat arus  $J$ . Kehadiran medan listrik ini yang mengakibatkan transport listrik yang bersifat disipatif. Oleh karena itu gerak vorteks harus dicegah agar tidak terjadi efek disipasi

Gaya penghalang (pinning force) dapat mencegah gerak fluksoid. Sumber efek pinning dapat berupa inhomogenitas bahan yang berkaitan dengan kehadiran permukaan pembatas, batas butir ataupun cacat kristal yang terdiri dari Cacat titik (point defect)

meliputi cacat schottky (kekosongan), cacat frankle (innerstitial) dan cacat garis meliputi dislokasi.

Cacat kristal atau impuritas yang hadir dapat berfungsi sebagai pinning. Secara mikroskopik kehadiran cacat dapat dilukiskan sebagai kehadiran perangkap atau potensial barier yang menghalangi vorteks. Kekutan pinning dapat diungkapkan sebagai besarnya potensial barier tersebut.

Mekanisme efek cacat sebagai pinning center tersebut dapat dibagi menurut ukuran  $\xi$ . Untuk superkonduktor konvensional, efek pinning biasanya bersumber dari inhomogenitas bahan karena  $\xi$  berkisar ratusan amstrong yang jauh melampaui cacat titik (cacat kristal lokal), sehingga dalam superkonduktor konvensional kehadiran cacat garis dan cacat butir menghasilkan pinning yang efektif yang pada gilirannya dapat meningkatkan rapat arus kritis.

Untuk bahan superkonduktor suhu tinggi dengan  $\xi$  berkisar puluhan amstrong, efek pinning biasanya bersumber dari cacat titik seperti kekosongan oksigen.

Pada superkonduktor tipe II, efek Meissner (efek diamagnetis sempurna) belum tentu berlaku untuk seluruh jangkauan variasi medan sampai  $H_{c2}$ . Batas bawah medan luar yang harus dipenuhi untuk mempertahankan efek Meissner ini disebut medan kritis bawah,  $H_{c1}$ . Medan  $H$  yang menerobos ke dalam superkonduktor akan terkuantitasi dalam daerah berjari-jari  $\xi$  dengan ukuran fluxi medan  $B$  sebesar  $\phi_0 = \frac{h}{q^*}$ .

Dari persamaan London II yang dimodifikasi dengan sumber yang berkaitan dengan kehadiran fluxoid yang dirumuskan berikut ini

$$\nabla \times (\Lambda J) + B = \phi_0 \delta(x) \hat{x}_3 \quad \text{dengan } \Lambda = \mu_0 \lambda^2$$

dengan bantuan persamaan Maxwell

$$\nabla \times H = J \text{ dan } \nabla \cdot H = 0$$

dan untuk superkonduktor isotropik, maka persamaan London II dirumuskan sebagai berikut

$$\nabla^2 H - \frac{1}{\lambda^2} H = -\frac{\phi_o}{\mu_o \lambda^2} \delta(\underline{x}) \quad (7.38)$$

dengan  $H = H \hat{x}_3$

persamaan ini memiliki solusi khusus

$$H(r) = \frac{\phi_o}{2\pi\mu_o\lambda^2} K_o\left(\frac{r}{\lambda}\right) \quad (7.39)$$

dengan  $K_o$  adalah fungsi Beseel termodifikasi jenis kedua

dan dari persamaan Maxwel maka rapat arus superkonduktor dirumuskan sebagai berikut:

$$\bar{J}_s = \frac{\phi_o}{2\pi\mu_o\lambda^3} K_1\left(\frac{r}{\lambda}\right) \hat{\phi} \quad (7.40)$$

dengan  $\frac{d}{dx} K_o(x) = -K_1(x)$

untuk menentukan keadaan (medan luar H) yang akan mengahdirkan satu fluxoid di dalam superkonduktor tipe II, diperlihatkan dari energi bebas Gibss bagi bahan superkonduktor yang memiliki satu fluxoid

$$G(H, T) = G(0, T) + U - H \cdot B \quad (7.41)$$

energi magnetik Medan

$$\epsilon_m = \frac{1}{2\mu_o} \int B^2(\underline{x}) d^3x \quad (7.42a)$$

dan energi kinetik superelektron

$$\epsilon_k = \frac{\mu_o}{2} \int d^3x \lambda^2 j^2(\underline{x}) \quad (7.42b)$$

sehingga energi total  $U = \frac{1}{2\mu_0} \int [B^2 + \mu_0^2 \lambda^2 J^2] d^3x$

$$= \frac{\phi_o^2}{4\pi\mu_0\lambda^2} K_0 \left( \frac{\xi}{\lambda} \right) \quad (7.43)$$

dengan demikian

$$G(H, T) - G(0, T) = U - H \cdot B \quad (7.44a)$$

untuk  $B = \phi_o$

maka

$$G(H, T) = G(0, T) + U - H\phi_o \quad (7.44b)$$

Jika selisih energi ini negatif, maka penetrasi **H** ke dalam superkonduktor akan mengurangi **F** dan menghasilkan keadaan yang lebih stabil, dan ini terjadi jika

$$H\phi_o > U \text{ atau } H > \frac{U}{\phi_o}$$

batas maksimum medan H sebelum terjadi penetrasi fluxoid tersebut disebut medan kritis bawah dan dirumuskan sebagai berikut

$$H_{c1} = \frac{U}{\phi_o} = \frac{\phi_o}{4\pi\mu_0\lambda^2} K_0 \left( \frac{\xi}{\lambda} \right) \quad (7.45a)$$

untuk superkonduktor tipe II dengan  $\kappa$  besar ( $\lambda \gg \xi$ )

$$H_{c1} = \frac{\phi_o}{4\pi\mu_0\lambda^2} \ln \left( \frac{\lambda}{\xi} \right) \quad (7.45b)$$

superkonduktor tipe II dapat mempertahankan keadaan superkonduktif sampai  $H_{c2}$  dengan membendung medan magnet yang menerobos masuk dalam bentuk fluxoid yang terkuantisasi dan terperangkap dalam tabung yang berukuran jari-jari  $\xi$ . Daerah diantara tabung fluxoid yang bebas dari medan magnet tetap

bersifat diamagnetik sempurna dan mengandung superelektron yang merupakan syarat bagi keadaan superkonduktif. Transportasi listrik tanpa hambatan hanya dapat berlangsung melalui daerah tersebut.

Namun keadaan sesungguhnya tidak sesederhana itu, superkonduktivitas tidak akan terjamin dengan sendirinya dengan kehadiran superelektron diantara daerah vorteks. Karena kehadiran vorteks walaupun dibendung/dilokalisasi dalam kolom-kolom tersusun secara teratur, dengan sendirinya akan menimbulkan interaksi antara medan  $H$  dan arus  $J$  yang mengalir disekitarnya. Sebagai akibatnya, fluxoid dalam bahan akan mengalami gaya Lorentz

$$F = J \times B \tag{7.46}$$

gaya ini akan menggerakkan fluxoid dengan kecepatan tertentu. Berdasarkan hukum Faraday (Persamaan Maxwell III) gerakan fluxoid tersebut akan menimbulkan medan listrik  $E$  menurut persamaan

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{7.47}$$

Kehadiran  $E$  akan menimbulkan keadaan transport yang bersifat disipatif seperti yang ditunjukkan persamaan berikut ini

$$V = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt} \int B \cdot ds = \frac{d}{dt} \int \phi l dx$$

$$= n_v \phi_o l \dot{x} \text{ dengan } \phi = n_v \phi_o \tag{7.48}$$

maka daya disipasinya

$$P = IV = I \phi_o n_v \dot{x} l \tag{7.49}$$

sehingga apabila vorteks dalam bahan superkonduktor bergerak secara bebas tanpa halangan, maka bahan bersangkutan tidak

dapat menghantar arus tanpa disipasi dalam medan luar diatas  $H_{c1}$ .

## **Aplikasi Superkonduktor**

### **Bearing (Bantalan) Superkonduktor untuk Aplikasi Roda Gila**

Berikut ini uraian dari aplikasi superkonduktor sebagai bearing superkonduktor pada sistem roda gila untuk penyimpan energi. Bagian berikut ini akan mengungkap konsep sains berkaitan levitasi magnetik dari superkonduktor kemudian dilanjutkan dengan desain teknologi aplikasi superkonduktor sebagai bearing superkonduktor pada roda gila.

Roda gila biasanya digunakan sebagai penyimpan energi saat arus dan konsumsi daya listrik melebihi daya yang tersedia. Meningkatnya penggunaan kincir angin atau sinar matahari sebagai sumber listrik menyebabkan meningkatnya kebutuhan untuk menyimpan energi dalam jangka panjang, artinya daya yang dihasilkan pada malam hari dapat disimpan untuk keesokan paginya.

Efek gesekan pada roda gila konvensional menghasilkan energi yang hilang terlalu besar sehingga tidak efisien untuk menyimpan energi selama periode waktu tertentu misalkan 12 jam, tetapi pengembangan bearing magnetik dan superkonduktor telah mengurangi gesekan berkali lipat sehingga desain roda gila yang efisien menjadi sebuah tantangan selama dekade terakhir ini.

Bab ini akan merangkum desain teknologi sederhana dari superkonduktor suhu tinggi sebagai bearing pada roda gila yang digunakan untuk penyimpanan energi. Tujuannya adalah untuk menguraikan konsep dasar levitasi magnetik dan superkonduktor sehingga dapat diaplikasikan sebagai bearing magnetik.

---

Pada bab ini diawali dengan pengenalan singkat tentang sifat dasar bearing konvensional dan kemudian dilanjutkan dengan perhitungan batas kerugian akibat gesekan yang menunjukkan kehilangan energi yang sangat besar akibat gesekan sehingga diperlukan teknologi bearing yang baru seperti magnet atau levitasi superkonduktor. Pengantar teori levitasi magnetik dan superkonduktivitas juga diberikan pada bab ini untuk mengevaluasi sifat dasar bearing superkonduktor. Bagian akhir mendeskripsikan aplikasi sistem roda gila yang melibatkan superkonduktor.

### **Konsep Dasar Bearing**

Bearing pertama kali dibuat tahun 3000 SM di Irak. Bearing ini berbentuk pelat kayu yang dipasang pada penyangga yang terbuat dari kayu juga. Modifikasi teknologi terus berkembang terutama pada konsep pengembangan poros dan bearing sejak revolusi industri pada abad 1700. Saat ini bearing digunakan pada hampir semua mesin yang dibuat, termasuk roda gila.

### **Parameter Bearing**

Bearing untuk sistem roda gila memiliki parameter yang menarik untuk didesain. Berikut ini parameter yang terkait dengan desain bearing untuk sistem roda gila

1. Kapasitas beban statis yang terkait dengan gaya angkat
2. Kekuatan/kekakuan
3. Koefisien gesekan
4. Gaya angkat non-linier dan stabilitas dinamis

Berikut ini uraian ringkas dari parameter di atas

### **Kapasitas Beban Statis**

Bearing standar didesain dari sebuah *outer house* (bagian luar) dengan bagian dalam yang berputar dipasang poros untuk penompang. Kontak antara bagian dalam dan bagian luar dihubungkan dengan objek/benda berputar atau dengan cairan seperti minyak. Dengan demikian kapasitas beban statis ditunjukkan oleh perubahan bentuk plastis dari benda berputar atau dari berpindahnya cairan di antara bagian-bagian yang bergerak.

Bearing standar didesain untuk menumpu poros yang mempunyai beban, sehingga putaran atau gerakan bolak-baliknya dapat berlangsung secara halus, aman, dan mempunyai umur yang panjang. *Bearing* harus cukup kokoh untuk memungkinkan poros serta elemen lainnya bekerja dengan baik. Jika *bearing* tidak berfungsi dengan baik maka seluruh sistem tidak dapat bekerja secara semestinya.

### **Kekakuan/Kekuatan**

Kekakuan  $\kappa$  bearing didefinisikan sebagai diferensiasi dari gaya bearing terhadap perpindahan poros menjauh dari keseimbangan

$$\kappa = -\left.\frac{dF}{dx}\right|_{x=x_0} \quad (7.50)$$

Kekakuan menggambarkan respon gaya linier dari bearing. Pada bearing mekanik atau fluida, kekakuan ditentukan oleh elastisitas objek berputar atau kompresibilitas fluida.

### **Koefisien Gesekan**

Koefisien gesekan adalah ukuran gaya hambat pada bagian bearing yang bergerak. Ini didefinisikan sebagai rasio antara gaya hambat  $F_D$  dan gaya angkat  $F_L$  dari bearing.

---

$$\mu = \frac{F_D}{F_L} \quad (7.51)$$

Definisi ini ekuivalen dengan gaya hambat pada sebuah benda yang dipindahkan pada sebuah permukaan kasar sedangkan gaya angkat berkaitan dengan gaya gravitasi pada benda.

### **Stabilitas Nonlinier dan Dinamik**

Persamaan gerak poros yang berputar pada bearing akan bergantung pada kekakuan yang direpresentasikan dalam teori respons linier, tetapi hubungan antara gaya angkat dan perpindahan kerap didefinisikan dalam bentuk non-linear sehingga, kondisi realistis sistem digambarkan dengan persamaan gerak non-linier. Hal ini akan menyebabkan dinamika sistem yang jauh lebih rumit daripada yang diprediksi dari teori respons linier dan bahkan gerakan chaos/acak bisa muncul.

### **Desain Roda Gila**

Roda gila adalah alat untuk menyimpan energi kinetik dalam bentuk gerak rotasi dari roda pada poros. Energi kinetik berhubungan dengan kecepatan rotasi  $\omega$  dan momen inersia roda gila  $I$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (7.52)$$

### **Kerugian Akibat Gesekan**

Berikut ini akan diuraikan kerugian akibat gesekan dari penggunaan bearing konvensional pada sistem yang didefinisikan oleh persamaan (2). Gambar 7.13 menunjukkan desain roda gila sederhana yang bermassa  $M$  dan jari-jari  $R$  dengan sumbu rotasi vertikal disupport oleh bearing bola. Gaya hambat/gesekan,  $F_D$  menyebabkan torsi pada sumbu rotasi dengan radius  $R_D$

$$|\tau| = |R_D \times F_D| = I \frac{d\omega}{dt} \quad (7.53)$$

Dengan  $I$  adalah momen inersia roda gila yaitu  $I = MR^2$  dan besar gaya angkat sama dengan besar gaya gravitasi/gaya berat  $F_L = Mg$  maka koefisien gesekan dirumuskan dengan

$$\mu = -\frac{R^2}{gR_D} \frac{d\omega}{dt} \quad (7.54)$$

Dari persamaan (5), koefisien gesekan menyebabkan penurunan kecepatan putaran roda gila dan juga bergantung pada geometri spesifik dari sistem roda gila. Substitusi percepatan sudut yang diperoleh dari energi kinetik yang diberikan oleh persamaan (3) dan diperoleh ekspresi energi relatif sistem yang hilang sebagai berikut

$$\frac{\frac{dE}{dt}}{E} = -\frac{2gR_D}{R^2} \frac{\mu}{\omega} \quad (7.55)$$

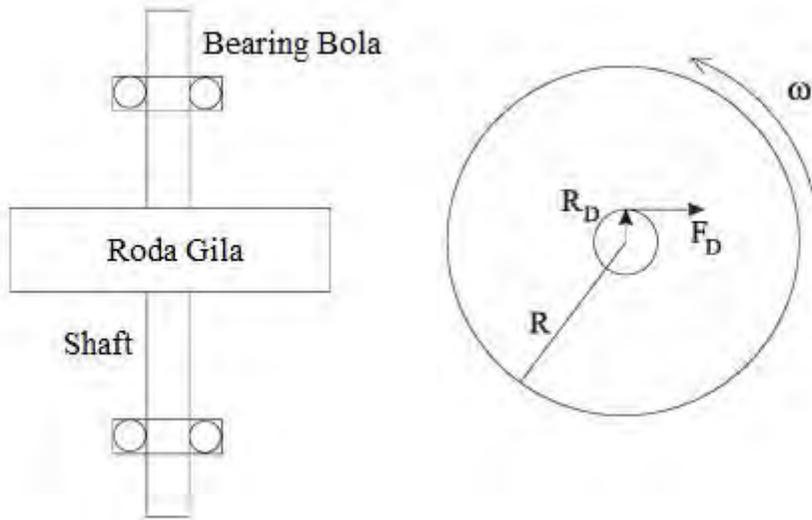
Persamaan 6 menunjukkan bahwa untuk mengurangi energi relatif yang hilang, maka harus mengurangi nilai koefisien gesekan atau mempercepat rotasi roda gila. Ketergantungan  $\omega$  merefleksikan bahwa skala kerugian akibat gaya hambat bergantung pada  $\omega$  sedangkan skala energi kinetik bergantung pada  $\omega^2$ . Pada penurunan persamaan di atas diasumsikan bahwa gaya hambat tidak bergantung pada kecepatan roda gila.

### **Perhitungan Koefisien Gesekan pada Desain Prototype Roda Gila**

Berikut ini akan dideskripsikan desain prototipe roda gila untuk penyimpanan energi 1 kWh = 3,6 MJ, yang diperoleh dengan memutar rotor dengan radius  $R = 0,2$  m dan berat  $M = 20$  kg dengan rotasi 30000 RPM ( $\omega_0 = 3,2 \times 10^3$  rad s<sup>-1</sup>). Dengan mengintegrasikan persamaan (5) maka akan diperoleh fraksi dari energi kinetik pada waktu tertentu terhadap energi kinetik awal sebagai berikut

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\frac{1}{2}I\omega^2}{\frac{1}{2}I\omega_0^2} = \left(1 - \frac{\mu g R_D}{\omega_0 R^2} t\right)^2 \quad (7.56)$$

Nilai  $\mu$  dapat diperkirakan jika roda gila harus berotasi selama 12 jam dan jika energi yang hilang sebesar 10 persen dengan  $R_D = 0,01 \text{ m}$  dan  $g = 9,82 \text{ ms}^{-2}$ .



Gambar 7.13 a: Sistem roda gila yang disupport oleh bearing bola. b. Piringan roda gila dengan radius  $R$  yang terlihat dari atas. Gaya hambat/gesek bearing bola ditunjukkan oleh  $F_D$  dan bekerja pada shaft/penyanggah berjari  $R_D$ .

Substitusi nilai-nilai di atas, maka diperoleh besar koefisien gesekan sebagai berikut:

$$\mu = \frac{\omega_0 R^2}{g R_D t \frac{E}{E_0}} \left(1 - \sqrt{\frac{E}{E_0}}\right) = 1,5 \times 10^{-3} \quad (7.57)$$

Bearing bola biasa biasanya memiliki nilai koefisien gesekan yang berkisar  $\mu = 10^{-3}$ , Analisa perhitungan di atas adalah untuk kasus sederhana yang hanya melibatkan kehilangan energi kinetik dan jika ada kerugian dari faktor yang lain misalkan pada motor/generator atau konverter daya, maka sistem harus dapat beroperasi dengan nilai  $\mu$  yang lebih kecil untuk memenuhi syarat hanya 10 persen total energi yang hilang selama 12 jam. Jika hanya

1 persen energi kinetik yang hilang selama 12 jam maka nilai koefisien gesekan berkisar  $\mu = 10^{-4}$ , kondisi ini tidak akan dipenuhi jika menggunakan bearing bola.

Masalah utama bearing konvensional adalah kontak mekanik antara poros dan *outer house* untuk tempat pemasangan bearing, yang menyebabkan koefisien gesekan menjadi tinggi dan keausan bearing yang mengakibatkan peningkatan kebutuhan pemeliharaan. Untuk meningkatkan kinerja bearing maka dapat didesain poros/shaft yang diposisikan tanpa menyentuh bearing. Ini dapat dilakukan dengan memanfaatkan gaya magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen atau elektromagnet.

Bagian berikut ini akan mengungkapkan konsep gaya magnetik dan menunjukkan pentingnya elemen stabilisasi dalam pengaplikasian magnetik bearing.

### **Levitasi Magnetik**

Ketika dua magnet dengan kutub yang berbeda didekatkan maka akan terasa gaya tolak. Sensasi ini memberikan ide cukup menarik untuk menggunakan gaya tolak ini untuk menyeimbangkan gaya gravitasi yang akan menghasilkan levitasi magnetik tanpa ada kontak mekanik.

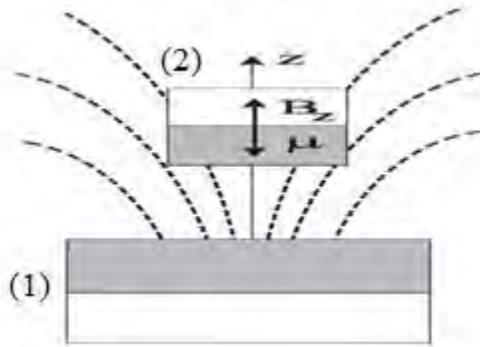
Pada tahun 1842 Earnshaw membuktikan bahwa ide di atas tidak dapat dilakukan pada sistem statis dari magnet permanen.

### **TEOREMA EARNSHAW**

Konsekuensi dari teorema Earnshaw [Ref. 1] adalah bahwa levitasi magnet permanen hanya dapat terjadi di titik tengah (keseimbangan pelana) di mana kedua sisi menunjukkan arah garis medan yang stabil sedangkan semakin ke pinggir semakin tidak stabil. Hal ini dapat diilustrasikan dengan magnet permanen

---

yang kutub utaranya berhadapan kutub utara magnet yang diposisikan tetap seperti yang ditunjukkan pada gambar 7.14.



Gambar 7.14. Ilustrasi dari teori Earnshaw dari dua magnet dengan kutub yang sama didekatkan satu sama lain.  $\mu$  merepresentasikan momen dipol levitasi magnet pada jarak  $z$  terhadap magnet bawah (1) yang menghasilkan medan  $B_z$  pada magnet atas (2). Garis-garis medan magnet bawah diindikasikan dengan garis putus-putus.

Dengan mengasumsikan bahwa magnet memiliki simetri rotasi terhadap sumbu  $z$  dan bahwa magnet atas dapat dipertimbangkan sebagai sebuah benda bermassa maka energi pada magnet atas dapat ditulis sebagai penjumlahan suku gravitasi dan suku interaksi dipol

$$U = mgz - \mu \cdot B = mgz - \mu B_z \cos \theta \quad (7.58)$$

Dimana  $m$  adalah massa dari magnet yang mengalami levitasi pada jarak  $z$ ,  $g$  adalah percepatan gravitasi,  $\mu$  adalah momen dipol magnet dan  $B_z$  adalah medan magnet yang dihasilkan oleh magnet bawah pada arah  $z$  dan  $\theta$  adalah sudut antara medan dan arah dipol.

Kesetimbangan magnet atas dapat ditentukan dari lenyapnya nilai diferensiasi  $U$  terhadap koordinat dan sudut kemiringan  $\theta$

$$\frac{\partial U}{\partial r_i} = 0 \quad \text{untuk } r_i = x, y, z, \theta \quad (7.59)$$

Dengan mensubsitusi persamaan (9) ke persamaan (10) pada  $x, y = 0$ ,  $z = z_0$  dan  $\theta = 180^\circ$  maka diperoleh

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \mu \frac{\partial B_z}{\partial x} = 0 \quad (7.60)$$

$$\frac{\partial U}{\partial y} = \mu \frac{\partial B_z}{\partial y} = 0 \quad (7.61)$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} = mg + \mu \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (7.62)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = \mu B_z \sin \theta = 0 \quad (7.63)$$

Persamaan (11) dan (12) terpenuhi karena komponen  $z$  dari medan magnet bernilai maksimum yang direpresentasikan dari turunan pertamanya bernilai nol. Dari persamaan (13) terlihat bahwa gaya levitasi magnet akan berkurang akibat penurunan kekuatan medan ketika semakin jauh dari magnet bawah (1). Persamaan keempat memberikan nilai nol karena  $\sin 180^\circ = 0$ .

Keseimbangan yang stabil terjadi jika sistem dalam keadaan dengan energi minimum yang direpresentasikan oleh turunan kedua dari energi  $U$  bernilai positif untuk semua arah maupun sudut kemiringan

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r_i^2} = \mu \frac{\partial^2 B_z}{\partial r_i^2} > 0 \quad \text{untuk } r_i = x, y, z, \theta \quad (7.64)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} = \mu B_z > 0 \quad (7.65)$$

Arah spasial dapat dianalisis melalui persamaan fundamental Maxwell. Karena tidak ada arus yang mengalir pada sistem, dapat disimpulkan bahwa rotasi rapat fluks magnetic  $B$  adalah nol dan nilai  $B$  ditentukan dari hukum Laplace

$$\{\nabla \cdot B = 0 \nabla \times B = J = 0\} \Rightarrow \nabla^2 B = 0 \quad (7.66)$$

Yang memberikan kondisi berikut ini

$$\frac{d^2 B_z}{dx^2} + \frac{d^2 B_z}{dy^2} + \frac{d^2 B_z}{dz^2} = 0 \quad (7.67)$$

Interpretasi dari persamaan 18 adalah tidak mungkin turunan kedua bernilai positif untuk arah x, y dan z pada waktu yang sama. Ini menunjukkan bahwa kondisi kesetimbangan stabil (persamaan 15) tidak dapat dipenuhi untuk semua koordinat. Hal ini dapat dibuktikan dengan mengevaluasi persamaan (15) dengan persamaan (11). Turunan kedua terhadap z bernilai positif karena medan magnet dari magnet bawah (1) meluruh dalam fungsi  $r^{-3}$ , tetapi turunan terhadap x dan y bernilai negatif karena medan magnet dalam arah z mencapai maksimum pada sumbu simetri.

Turunan kedua energi terhadap sudut kemiringan adalah negatif  $\frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2} = \mu B_z \cos \cos (180^\circ) < 0$  yang menunjukkan bahwa sistem tidak stabil terhadap kemiringan. Dengan demikian magnet atas pada gambar (7.14) akan membalik dan tertarik ke kutub utara magnet bawah walaupun dengan gangguan yang sangat kecil.

Teorema Earnshaw umumnya menyatakan bahwa setiap kumpulan partikel magnetik harus memenuhi persamaan Laplace (persamaan 17) yang merepresentasikan sistem tidak dapat berada dalam kesetimbangan stabil ke segala arah. Apa yang dipelajari dari teorema Earnshaws adalah bahwa bukan hanya persoalan menemukan konfigurasi dari magnet permanen untuk mendapatkan keseimbangan yang stabil, beberapa komponen selain magnet permanen juga harus ditambahkan untuk mensupport kesetabilan sistem.

## Gaya Magnet

Medan magnet dihasilkan dari pergerakan partikel bermuatan atau dari spin partikel dalam zat padat. Kerapatan fluks magnet  $\mathbf{B}$  didefinisikan sebagai jumlah dari kuat medan magnet  $\mathbf{H}$  dalam ruang dengan kerapatan magnetisasi  $M$  yang disebabkan oleh momen atom-atom dalam zat padat, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (7.68)$$

Dimana  $\mu_0$  adalah permeabilitas vakum.

Perhitungan gaya akibat medan magnetik dengan benda padat termagnetisasi dilakukan dengan mengasumsikan momen atom dalam padat benda dihasilkan oleh loop berarus kecil. Intuisi ini terinspirasi oleh fakta bahwa elektron bergerak mengelilingi inti atom dalam lintasan orbital. Penurunan di bawah ini akan mengasumsikan bahwa medan magnetik hanya dihasilkan oleh arus dan koneksi dengan kerapatan magnetisasi.

Gaya yang dialami sebuah kawat kecil  $ds$  bermuatan  $q$  dengan rapat muatan  $n$  yang bergerak dengan kecepatan  $v$  dalam medan magnet  $\mathbf{B}$ , dirumuskan dari gaya Lorentz  $F = qE + qv \times B$ . Dengan mengasumsikan tidak ada medan listrik ( $E = 0$ ) maka

$$dF ds = \int_{kawat} nqv \times B dr = \left( \int_A JdA \right) ds \times B = Ids \times B \quad (7.69)$$

Dimana rapat arus diberikan dengan  $J = nqv$  dan integrasi rapat arus melewati penampang lintang kawat  $A$  memberikan total besar arus  $\mathbf{I}$  pada kawat. Perhitungan besar gaya pada sebuah loop kecil dilakukakan dengan mengintegrasikan persamaan (20) sepanjang loop

$$\begin{aligned}
F_{loop} &= \int_{loop} I ds \times B \\
&= -I \int_{permukaan} (\nabla \cdot B) dS - I \int_{permukaan} (\nabla \times B) \times dS \\
&\quad + I \int_{permukaan} (dS \cdot \nabla) B \\
&= I \int_{permukaan} (dS \cdot \nabla) B \quad (7.70)
\end{aligned}$$

Dengan menggunakan  $\nabla \cdot B = 0$  dan  $\nabla \times B = \mu J = 0$  karena loop ditempatkan dalam vakum. Selanjutnya gunakan identitas vektor untuk mentransformasi bentuk integral garis ke integral permukaan seluruh area loop. Karena ukuran dari arus loop dalam skala ukuran atom maka dapat diasumsikan bahwa gradien rapat fluks B akan konstan melewati arus loop, sehingga gaya pada loop dirumuskan dengan

$$F_{loop} = (IS \cdot \nabla) B \quad (7.71)$$

Persamaan (23) menunjukkan bahwa karakteristik loop berarus diberikan oleh kuantitas  $m = IS$  yang disebut dengan momen dipol loop. Dengan membagi gaya loop terhadap volume loop maka dapat diperoleh rapat gaya loop  $\rho_F$

$$\rho_F(r) = (M \cdot \nabla) B \quad (7.72)$$

dimana rapat magnetik  $M = \frac{m}{V_{loop}}$ . Kerapatan magnet diasumsikan sebagai medan magnet yang dihasilkan pada pusat loop dan selanjutnya memungkinkan untuk menulis rapat fluks magnetik yang diberikan oleh persamaan (19) sebagai penjumlahan kuat medan vakum  $\mathbf{H}$  yang dihasilkan oleh arus makroskopik dalam koil dengan rapat magnetisasi  $\mathbf{M}$  yang dihasilkan oleh arus mikroskopik yang bersirkulasi di sekitar atom dalam benda padat.

Total gaya pada benda padat yang memiliki banyak momen dipol atomik dapat dihitung dari integrasi rapat gaya loop (persamaan 24) sebagai berikut

$$F = \int_{\text{sampel}} \rho_F(r) dr = \int_{\text{sampel}} (M \cdot \nabla) B dr \quad (7.73)$$

Dengan demikian gaya yang dialami benda termagnetisasi dapat dihitung jika kerapatan magnetisasi spasial dalam benda padat dan distribusi medan magnet dari semua sumber diketahui. Proses perhitungan distribusi medan dalam geometri sembarang cukup sulit dan seringkali kita harus menggunakan metode elemen hingga untuk menyelesaikan persamaan Maxwell.

### Stress Magnetik

Maxwell dan Faraday mengasumsikan bahwa besar gaya antara magnet yang berbeda dapat direpresentasikan dengan garis-garis gaya magnet atau garis-garis medan magnet. Tension/tegangan dan tekanan akan bekerja sepanjang garis medan dalam arah normal terhadap garis-garis medan. Dapat ditunjukkan bahwa gaya  $dF$  yang bekerja pada permukaan elemen diilustrasikan pada gambar 7.15, dapat didekomposisikan ke dalam gaya yang diberikan oleh komponen medan normal dan medan tangensial  $B = B_n n + B_s s$

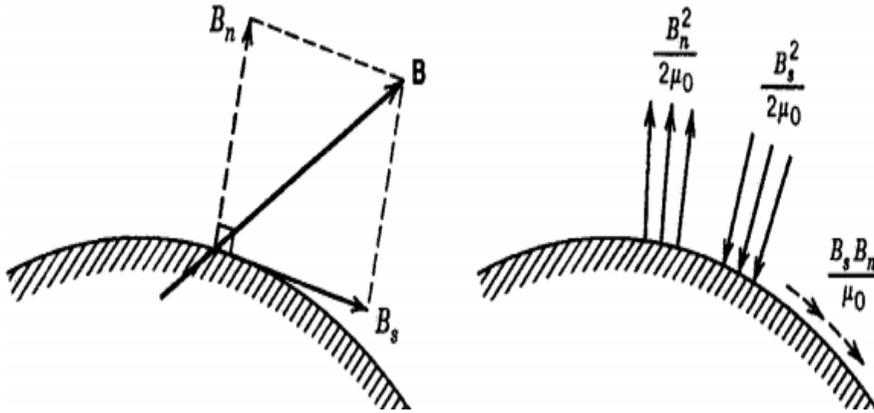
$$dF = [(\sigma - p_m)n + \tau_m s] dA \quad (7.74)$$

Dimana  $\sigma$  adalah tegangan/tension medan magnetik,  $p_m$  adalah tekanan magnetik dan  $\tau_m$  adalah shear magnet yang dirumuskan dengan

$$\sigma = \frac{B_n^2}{2\mu_0} \quad (7.75)$$

$$p_m = \frac{B_s^2}{2\mu_0} \quad (7.76)$$

$$\tau_m = \frac{B_n B_s}{\mu_0} \quad (7.77)$$



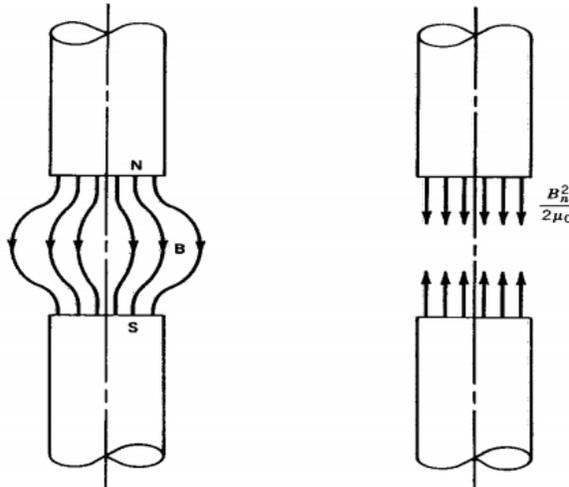
Gambar 7.15 kiri: Definisi rapat fluks magnetik pada komponen permukaan dan komponen normal pada permukaan ruang. Kanan: Tension, tekanan dan gaya geser (shear forces) pada permukaan yang disebabkan oleh komponen gaya normal dan tangensial yang ditunjukkan oleh arah panah.

Sehingga dapat ditentukan total gaya sumber magnet dalam volume  $V$  dengan mengintegrasikan persamaan (29) terhadap permukaan  $S_V$  yang mendefinisikan  $V$

$$F = \frac{1}{2\mu_0} \int_{S_V} [(B_n^2 - B_s^2)n + 2B_n B_n s] dA \quad (7.78)$$

Untuk mengilustrasikan konsep tegangan magnet, gambar 7.16 menunjukkan dua kutub magnet yang berbeda yang saling berhadapan. Garis medan magnet terlihat di kiri dan karena hanya ada komponen normal medan pada permukaan kutub, tegangan akan bekerja pada kedua magnet yang diperlihatkan di sebelah kanan. Total gaya pada salah satu magnet dapat ditentukan dengan menghitung perbedaan tegangan pada kedua ujung kutub.

Medan magnet di sekitar dua magnet diberikan dari penjumlahan vektor dari kedua medan magnet, sedangkan komponen medan normal pada kutub saling berhadapan akan lebih besar dari komponen medan pada kutub yang saling menjauh satu sama lain.

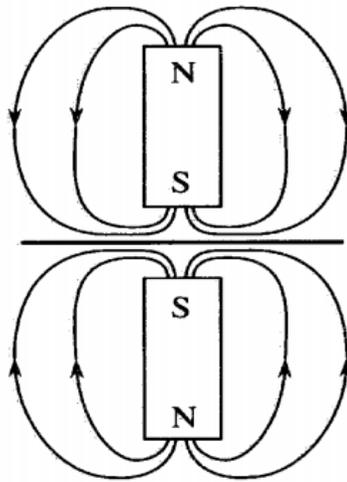


Gambar 7.16. Kiri: Garis medan magnet antara kutub utara dan selatan saling berhadapan. Kanan: Tegangan antara kutub yang disebabkan oleh komponen medan normal pada permukaan kutub.

Estimasi besar tegangan magnet  $\sigma$  dapat dihitung dari persamaan (27). Jika magnet permanen memiliki nilai medan pada permukaan sebesar 0.5 T, maka besar tegangan magnet adalah

$$\sigma = \frac{B_n^2}{2\mu_0} = \frac{(0.5)^2}{2 \times 4\pi \times 10^{-7} \text{NA}^{-2}} = 10 \text{ Ncm}^{-2} \quad (7.79)$$

Gambar 7.17 mengilustrasikan konsep tekanan magnet antara dua kutub magnet yang sama yang saling berhadapan. Garis medan merupakan kurva tertutup dari utara ke selatan kutub ( $\nabla \cdot B = 0$ ). Terlihat bahwa hanya ada komponen medan tangensial yang simetri pada bidang antar magnet. Ini menghasilkan tekanan pada kedua magnet sehingga magnet akan saling tolak menolak.



Gambar 7.18 Garis medan magnet di sekitar dua dipol magnet dengan kutub identik saling berhadapan. Hanya ada komponen medan tangensial yang simetri pada bidang antar magnet menghasilkan tekanan magnet yang mendorong dipol terpisah

Jika memungkinkan untuk menghasilkan levitasi yang stabil dari magnet permanen, maka dapat diperkirakan luas permukaan magnet yang diperlukan untuk mengangkat roda gila bermassa 20 kg. Besar tekanan magnet setara dengan mengangkat benda 1 kg per  $\text{cm}^2$  sehingga untuk mengangkat roda gila bermassa 20kg dibutuhkan luas permukaan magnet sebesar  $20 \text{ cm}^2$  yang dihasilkan oleh dua kutub magnet identik saling menghadap satu sama lain yang masing-masing berkekuatan 0.5 Tesla.

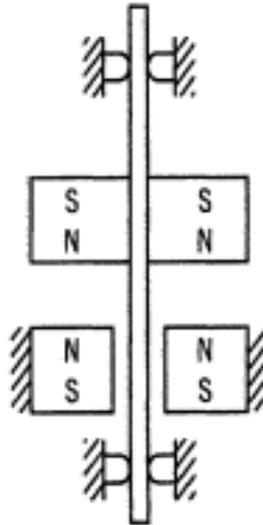
### **Magnetik Bearing (Bantalan Magnetik)**

Levitasi magnetik yang stabil hanya dapat diperoleh dalam arah tertentu, maka untuk mendapatkan kestabilan ke segala arah diperlukan kontak mekanis atau dengan gaya elektromagnetik yang dihasilkan dari beberapa regulasi elektronik. Gambar (7.19) menunjukkan bearing magnet pasif khusus, di mana gaya tolak antar dua kutub yang identik digunakan untuk mengangkat *shaft*. Namun *shaft* tidak stabil akibat kemiringan terhadap sumbu simetri magnet bearing sehingga diperlukan support mekanis pada

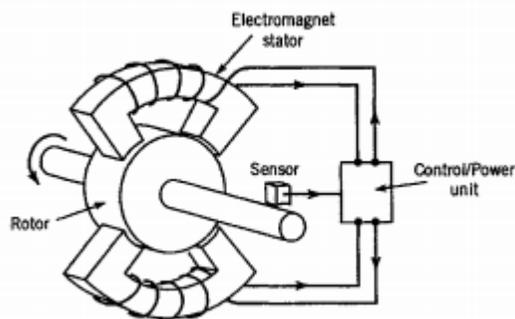
*shaft* untuk mencegah kemiringan. Gambar (7.20) menunjukkan desain elektro mekanis di mana sensor merupakan bagian dari loop umpan balik yang dapat mengubah gaya magnet dari bearing untuk mempertahankan posisi poros/*shaft*. Salah satu aplikasi umum dari bearing magnet aktif adalah sebagai support rotor pada pompa molekuler turbo untuk mendapatkan keadaan vakum ultra tinggi.

Kelemahan utama dari dua prinsip stabilisasi yang dijelaskan di atas adalah adanya kerugian yang disebabkan oleh kontak mekanis atau konversi daya yang tidak efisien pada sistem kontrol elektronik.

Superkonduktor dapat dimasukkan ke dalam bearing magnetik untuk menstabilkan sistem dalam arah  $x,y$  dan  $z$ , karena superkonduktor dapat menjebak medan magnet sehingga mencegah kemiringan magnet. Jadi support mekanis dari *shaft* yang ditunjukkan pada gambar dapat diganti dengan material superkonduktor dan magnet kecil pada *shaft* , sehingga levitasi yang stabil dapat diperoleh tanpa ada kontak apapun antara poros dan sekitarnya.



Gambar 7.19 Magnetik bearing pasif dengan support mekanik pada poros/shaft karena sistem tidak stabil terhadap kemiringan terhadap sumbu rotasi



Gambar 7.20 Magnetik Bearing aktif dengan sebuah loop feedback yang mengontrol posisi bearing.

### Superkonduktivitas

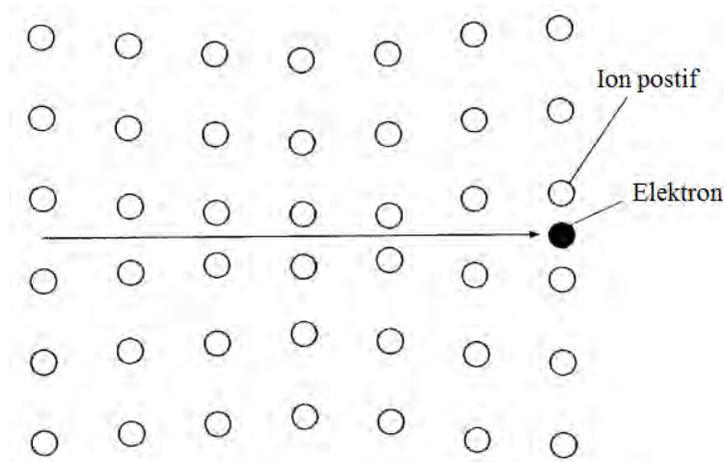
Superkonduktor dapat digunakan untuk mendapatkan levitasi magnet permanen yang stabil secara intrinsik, karena medan magnet dari magnet dapat terperangkap dalam superkonduktor. Fenomena ini disebut flux pinning. Sifat dasar dari superkonduktor akan diperkenalkan berikut ini untuk menjelaskan konsep fluks pinning dan untuk membahas potensi levitasi superkonduktor.

### **Pasangan Cooper**

Superkonduktivitas konvensional disebabkan oleh pasangan elektron konduksi dengan vektor gelombang dalam arah berlawanan dan berotasi sehingga menciptakan osilasi pada ion-ion dalam kisi kristal superkonduktor. Elektron berpasangan adalah disebut pasangan Cooper.

Pertanyaan mendasar yang membingungkan tentang superkonduktivitas adalah bagaimana pasangan Cooper yang terdiri dari dua elektron yang biasanya saling tolak menolak dapat berpasangan. Penjelasan secara kualitatif diilustrasikan pada gambar (7.21), yang menunjukkan bagaimana pergerakan suatu elektron dalam kisi ion positif dapat menyebabkan kontraksi kisi karena gaya tarik menarik antara elektron negatif dan ion positif. Keterlambatan pergerakan ion dibandingkan elektron disebabkan oleh perbedaan massa antara elektron dan ion. Peningkatan kerapatan lokal muatan positif dihasilkan dari kontraksi kisi sehingga elektron lain akan tertarik ke wilayah ini.

Jadi kedua elektron dipasangkan oleh penciptaan osilasi kisi dan mekanisme pasangan ini sering dikaitkan dengan interaksi mediasi fonon, karena osilasi kisi yang tereksitasi pada suhu berhingga disebut fonon. Osilasi kisi yang tereksitasi oleh elektron yang bergerak sering kali disebut fonon virtual. Namun, dua elektron pada pasangan Cooper tidak akan terus bersama untuk waktu yang lama karena mereka akan saling menjauh. Ketika jarak menjadi terlalu besar, pasangan Cooper berganti dengan pasangan Cooper yang lain dimana jarak antara elektron tetap dalam limit pasangan.



Gambar 7.21. Ilustrasi dari eksitasi osilasi kisi yang disebabkan oleh pergerakan elektron yang menghasilkan pasangan elektron menjadi pasangan Cooper dalam superkonduktor

Fenomena superkonduktivitas hanya terjadi di bawah suhu kritis,  $T_c$  dimana fluktuasi termal cukup kecil dibandingkan dengan fonon yang dimediasi oleh gaya tarik menarik dengan elektron. Ketika suhu di bawah suhu kritis  $T_c$ , maka akan ada dua jenis elektron yang muncul dalam superkonduktor yaitu elektron normal dan pasangan elektron yang menjadi pasangan Cooper. Jumlah total elektron dalam superkonduktor konstan, tetapi semakin banyak elektron normal yang akan menjadi pasangan Cooper ketika suhu di bawah suhu kritis. Fenomena superkonduktivitas dalam kondisi ini disebut dengan model dua-fluida Gorter-Casimir.

Untuk merusak pasangan Cooper maka harus ditambahkan energi yang setara dengan energi ikat pasangan. Keadaan superkonduktor atau daerah superkonduktor yang memiliki elektron normal disebut dengan keadaan normal.

### **Rapat Arus Kritis**

Salah satu sifat dasar dari keadaan superkonduktor adalah kemampuan untuk menghantarkan arus tanpa ada yang hilang, yang merupakan asal mula nama superkonduktor. Penjelasan

kualitatif untuk sifat ini adalah bahwa arus transport dalam superkonduktor akan menyebabkan semua elektron mengalir/bergerak dalam superkonduktor, dan jika salah satu elektron dalam pasangan Cooper dihamburkan oleh pengotor/impuritas, elektron ini hanya akan berganti pasangan, tetapi tetap dalam keadaan superkonduktor karena energi pergantian pasangan karena proses hamburan lebih kecil dari energi ikat pasangan Cooper. Proses transport pasangan Cooper tidak sensitif terhadap pengotor ketika transport elektron dalam konduktor normal terjadi pada suhu rendah, dibawah suhu kritis. Jika kerapatan arus yang melalui superkonduktor lebih besar dari rapat arus kritis  $J_c$ , maka pasangan Cooper akan rusak karena energi kinetik akibat arus antar dua elektron pasangan Cooper melebihi energi ikat pasangan Cooper.

### **Efek Meissner**

Pasangan elektron terdiri dari dua elektron dengan spin dan vektor gelombang yang berlawanan ( $-\hat{k} \uparrow, \hat{k} \downarrow$ ). Semua pasangan Cooper dalam superkonduktor dikorelasikan dan digambarkan dengan fungsi gelombang makroskopik  $\Psi$ . Jika molekulnya disumsikan sebagai superfluida, maka momentum total molekul adalah nol,  $p = -\hbar k + \hbar k = 0$ . Kehadiran medan magnet menyebabkan nilai momentum berubah akibat vektor potensial dan arus super akan mulai mengalir karena kekekalan momentum

$$P = p + q^* A = 0 \quad (7.80)$$

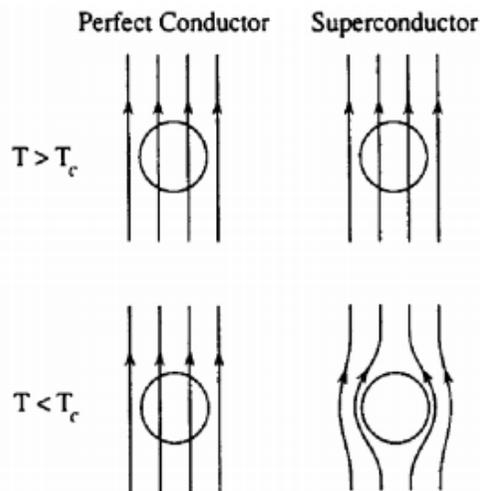
$$j = -\frac{nq^{*2}}{m^*} A \quad (7.81)$$

Dimana  $P$  adalah momentum kanonik,  $p$  adalah momentum dimana tidak ada medan magnet ( $p = m^* v$ ) dan  $\mathbf{A}$  adalah vector

potensial  $\nabla \times A = B$ . Kecepatan pasangan Cooper berkaitan dengan rapat arus  $j = nq^*v$ .

Persamaan (33) menunjukkan bahwa arus super akan mengalir berlawanan arah dengan vektor potensial. Hal ini menyebabkan arus super yang bersirkulasi di tepi sampel menyebabkan medan eksternal yang diaplikasikan pada sampel akan tertolak ketika sampel menjadi superkonduktor. Efek ini disebut efek Meissner dan diilustrasikan pada gambar (7.22).

Ada batas atas dari medan magnet eksternal yang dapat menghilangkan efek Meissner karena arus super bersirkulasi pada tepi sampel dibatasi oleh rapat arus kritis  $J_c$ . Superkonduktor akan rusak ketika nilai  $J_c$  sama atau melampaui medan eksternal yang diaplikasikan yang dinyatakan dengan medan magnet kritis  $H_c$ .



Gambar 7.22 Garis-garis medan magnet dalam superkonduktor yang ditolak ketika mulai masuk dalam sampel superkonduktor, karena arus super akan mulai bersirkulasi pada tepi sampel dan secara efektif menolak medan magnet eksternal yang menyebabkan lenyapnya medan magnet di dalam superkonduktor,  $B=0$ . Ini dikenal dengan efek Meissner

### Superkonduktor Tipe II

Superkonduktor dapat dibagi menjadi dua jenis bergantung pada rasio antara panjang koherensi  $\xi$  dan kedalaman penetrasi  $\lambda$

superkonduktor. Panjang koherensi adalah skala karakteristik panjang dari perubahan kerapatan pasangan Cooper dan kedalaman penetrasi adalah skala karakteristik panjang untuk menunjukkan kedalaman penetrasi medan magnetik dalam superkonduktor. Energi yang dikaitkan dengan dinding antara superkonduktor dan konduktor normal akan berubah dari positif ke negatif ketika

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi} \quad (7.82)$$

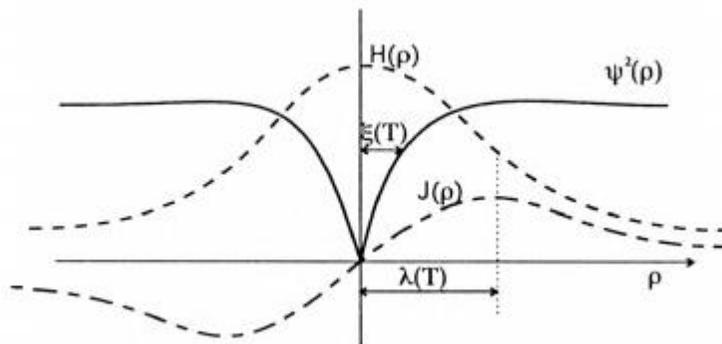
yang nilainya menjadi  $> \frac{1}{\sqrt{2}}$ . Superkonduktor dengan energi domain wall positif dan negatif masing-masing disebut dengan superkonduktor tipe I dan II.

Konsekuensi dari energi domain wall negatif bagi superkonduktor tipe-II adalah wall/dinding mengizinkan garis-garis medan magnetik eksternal masuk ke bulk dalam daerah non-superkonduktor. Ketika superkonduktor memperoleh energi dengan membuat wall/dinding, superkonduktor akan menghasilkan sebanyak mungkin wall dan membolehkan medan magnet eksternal masuk dalam daerah normal berukuran kecil yang banyak dari pada satu daerah yang berukuran besar. Ukuran daerah normal memiliki batas yang lebih kecil, yang ditentukan oleh sifat mekanika kuantum dari keadaan superkonduktor. Semua elektron dalam keadaan superkonduktor digambarkan oleh fungsi gelombang mekanika kuantum makroskopik yang sama. Fungsi gelombang ini kontinu di sekitar kontur tertutup. Ini berarti bahwa fase fungsi gelombang harus berubah sebesar bilangan bulat kali  $2\pi$  di sekitar kontur. Hal ini dapat ditunjukkan [9] bahwa ini mengarah ke kuantisasi fluks magnetik di daerah normal dalam

superkonduktor yang disebut fluks kuantum  $\Phi_0$  yang diberikan oleh

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} \quad (7.83)$$

Flux magnetik yang memasuki bagian dalam superkonduktor berbentuk silinder berukuran sangat kecil yang masing-masing membawa satu fluks kuantum. Daerah yang ditempati garis fluks ini menjadi daerah normal. Daerah normal ini disebut garis fluks atau vorteks. Dari teori Ginzburg-Landau dapat dihitung bagaimana pasangan Cooper ditekan pada pusat garis fluks dan bagaimana skrining arus superkonduktor menjaga fluks tetap di pusat garis fluks, seperti yang ditunjukkan pada gambar (7.23).



Gambar 7.23. Garis fluks dalam superkonduktor yang terdiri dari inti normal dengan medan magnet  $H(\rho)$  yang dihasilkan oleh arus super  $J(\rho)$  yang bersirkulasi disekitar inti. Peluruhan dari medan magnet ditentukan oleh kedalaman penetrasi  $\lambda(T)$  dan total fluks magnetik yang diperoleh dengan mengintegrasikan rapat fluks magnetik,  $\psi^2(\rho)$  menyatakan rapat pasangan Cooper dan ukuran inti normal ditentukan oleh panjang koherensi  $\xi(T)$ .

Garis fluks saling tolak-menolak dan membentuk kisi heksagonal (disebut kisi garis fluks) yang disebabkan oleh simetri rotasi dari garis fluks. Kisi ini dapat divisualisasikan dengan menguapkan partikel fero-magnetik ke permukaan superkonduktor ketika superkonduktor ditempatkan dalam daerah bermedan magnet.

Partikel fero-magnetik akan terkumpul pada pusat garis fluks karena kerapatan fluks magnetik lokal  $H(\rho)$ , seperti yang ditunjukkan pada gambar (7.23), lebih tinggi dari daerah yang menjauhi inti garis fluks. Gambar (7.24) menunjukkan gambar mikroskop elektron dari superkonduktor  $TmNi_2B_2C$  di mana partikel fero-magnetik telah menguap di permukaan. Bintik-bintik putih menggambarkan tumpukan partikel pada inti garis fluks dan struktur heksagonal kisi garis fluks dengan mudah terlihat.

Pemisahan garis fluks dalam kisi dikaitkan langsung dengan medan magnet eksternal karena setiap sudut dari unit sel segitiga memiliki  $\frac{1}{6}$  fluks kuantum seperti yang ditunjukkan pada gambar (7.25). Kerapatan fluks yang terintegrasi dalam area unit sel harus sama dengan jumlah fluks kuantum di dalam sel. Dengan menyederhanakan hasil integrasi dalam besaran kerapatan fluks rata-rata,  $B_\alpha$  dan luas area unit sel,  $A_{sel}$  maka diperoleh

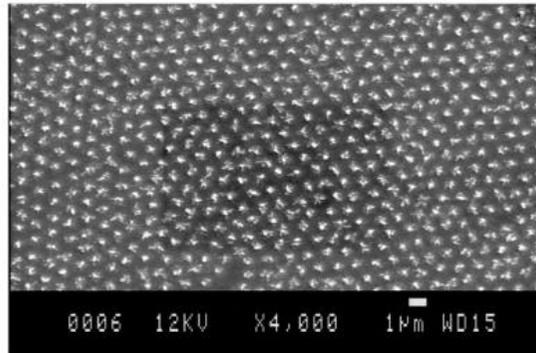
$$\frac{3}{6}\Phi_0 = B_\alpha A_{sel}$$

$$a = \sqrt{\frac{2\Phi_0}{\sqrt{3}B_\alpha}} \quad (7.84)$$

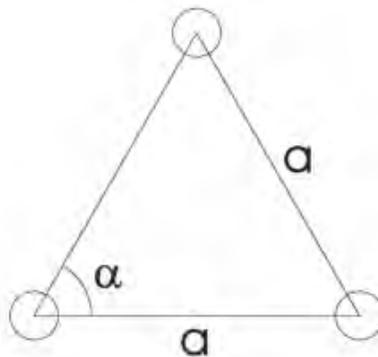
Persamaan (36) diperoleh dengan mensubsitusi unit area sel pada gambar (7.25).

Sifat magnetik superkonduktor type-II dideskripsikan dalam diagram fase H-T pada gambar (7.26). Jika nilai medan magnet kecil, maka medan ini akan ditolak sampel, tetapi untuk medan yang cukup tinggi dilambangkan  $H_{c1}$ , garis fluks akan menembus ke dalam bulk superkonduktor, sehingga bulk dalam keadaan mixed state (keadaan normal dan superkonduktor) seperti yang ditunjukkan gambar 7.24. Superkonduktivitas mulai terganggu

ketika inti dari garis fluks saling tumpang tindih, yang ditandai dengan  $H_{c2}$  dan bulk akan menjadi normal. Ini terjadi ketika separasi garis fluks,  $a$  yang diberikan oleh persamaan (36) menjadi sama dengan ukuran inti garis fluks yang diberikan oleh panjang koherensi  $\xi$  seperti yang ditunjukkan pada gambar (7.23).



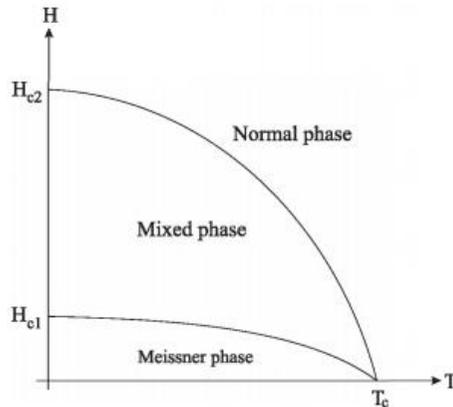
Gambar 7.24 Gambar mikroskop elektron dari superkonduktor  $TmNi_2B_2C$  setelah partikel besi feromagnetik diuapkan pada permukaan superkonduktor pada suhu  $T=4.2$  K dan medan magnetik eksternal  $H=20$  Oe. Bintik-bintik putih menunjukkan tumpukan partikel besi yang terkumpul pada inti garis fluks karena kerapatan fluks lokal yang lebih tinggi di pusat garis fluks sehingga dengan mudah dapat mengidentifikasi struktur heksagonal dari kisi garis fluks dari gambar [11].



Gambar 7.25. Unit sel dari garis kisi fluks heksagonal. Terdapat satu fluks kuantum pada setiap titik kisi yang memberikan fluks kuantum  $\frac{3}{6} = \frac{1}{2}$  di dalam unit sel heksagonal. Area pada unit sel dengan sederhana diberikan oleh  $A_{sel} = \frac{1}{2} a^2 \sin \sin (60^\circ)$  dimana  $a$  adalah jarak antara garis-garis fluks.

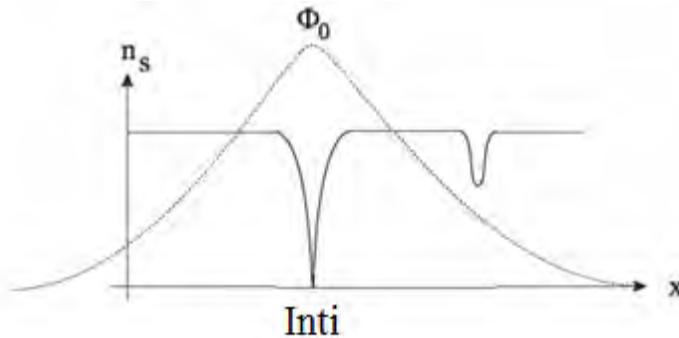
## Fluks Pinning

Pada superkonduktor tipe II, garis fluks dapat bergerak masuk dan keluar dari sampel ketika nilai medan eksternal berubah-ubah antara  $H_{c1}$  dan  $H_{c2}$ , tetapi jika superkonduktor memiliki beberapa cacat/impuritas maka garis fluks dapat terjebak pada cacat ini.



Gambar 7.26. Diagram fasa dari superkonduktor tipe II. Jika medan,  $H < H_{c1}$ , medan magnet akan ditolak dari sampel, dan ketika medan  $H > H_{c1}$ , medan akan masuk dalam sampel ketika  $H > H_{c1}$ . Keadaan superkonduktivitas akan terganggu ketika inti dari garis fluks saling tumpang tindih pada  $H > H_{c2}$ .

Cacat/impuritas dapat mengurangi kepadatan lokal pasangan Cooper dan karena tidak ada pasangan Cooper pada inti garis fluks, maka garis fluks dapat ditempatkan pada daerah dimana rapat pasangan Cooper kecil seperti yang ditunjukkan pada sisi kanan gambar 7.27. Cacat akan muncul ketika sumur potensial yang disebut pusat pinning dan garis fluks terjebak dalam pusat pinning.



Gambar 7.27. Sebuah garis fluks ditunjukkan pada sisi kiri dengan kerapatan pasangan Cooper  $n_s$ , yang nilainya menuju nol saat mendekati inti dan rapat fluks magnetik diindikasikan oleh garis-garis putus. Daerah superkonduktor memiliki energi lebih kecil dari daerah normal sedangkan energi sistem akan bertambah besar dengan melenyapkan pasangan Cooper dari inti garis fluks. Jika garis fluks yang dihasilkan pada daerah dimana rapat pasangan Cooper nya kecil seperti yang ditunjukkan pada sisi kanan gambar, maka akan lebih sedikit pasangan Cooper yang harus dilenyapkan yang menyebabkan kenaikan energi sistem lebih kecil. Ketika garis fluks berada pada spot yang lemah (sumur potensial), maka fluks akan terjebak dalam sumur potensial. Spot lemah muncul sebagai sebuah sumur energi dan harus diberikan gaya pada fluks untuk mengeluarkannya. Penjebakan fluks pada spot lemah disebut pinning.

Pada diskusi sebelumnya dinyatakan bahwa rapat arus kritis didefinisikan sebagai arus yang menghasilkan energi kinetik pasangan Cooper lebih besar dari energi ikat pasangan Cooper. Tetapi ini tidak tepat untuk superkonduktor tipe II yang terdiri dari garis fluks karena arus transport  $J$  akan menghasilkan sebuah gaya pada garis fluks yang bekerja tegak lurus pada sumbu garis fluks dan arah arus. Gaya persatuan panjang garis fluks adalah

$$f_t = J \times \Phi_0 \quad (7.85)$$

Jika garis fluks bergerak karena gaya yang diberikan, maka usaha telah dilakukan pada sistem dan energi akan hilang. Superkonduktor tipe-II dalam keadaan campuran (mixed state) dapat membawa arus transport tanpa kehilangan energi jika fluks

dipinning dan kerapatan arus kritis ditentukan oleh gaya depinning  $f_p$  sebagai berikut:

$$f_p = J_c \times \Phi_0 \quad (7.86)$$

Garis fluks yang menembus superkonduktor tipe-II dengan pusat pinning akan terdorong dan fluks akan bergerak ketika tekanan/gaya magnetik dari medan yang diberikan melebihi gaya pinning. Keadaan ini menghasilkan gradien kepadatan garis flux, yang terkait dengan arus superkonduktor yang mengalir pada tepi bahan superkonduktor yang direpresentasikan dengan persamaan Maxwell berikut ini

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad (7.87)$$

Gambar (7.28) menunjukkan contoh penetrasi fluks magnetik di dalam bahan superkonduktor yang memiliki pusat pinning dengan medan eksternal yang diberikan sebesar  $H_{app}$ . Kerapatan flux magnetik diplot sebagai fungsi dari posisi pada sampel. Di tepi sampel, kerapatan flux diberikan direpresentasikan dengan  $B_z = \mu_0 H_{app}$ , tetapi nilainya terus berkurang saat menuju pusat karena adanya pinning dan tidak ada medan magnet di bagian tengah sampel. Arus super yang mengalir pada tepi sampel dapat dihitung dari persamaan (39)

$$\mu_0 J = \frac{\partial B_z}{\partial y} \hat{x} - \frac{\partial B_z}{\partial x} \hat{y} \quad (7.88)$$

yang diilustrasikan pada gambar (7.28) dengan panah menandakan  $J_z$ . Arus super ini akan menyebabkan gaya yang bekerja tegak lurus pada terhadap garis flux dan arah arus super seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (37). Dengan demikian arus super akan mendorong garis flux ke tengah sampel seperti

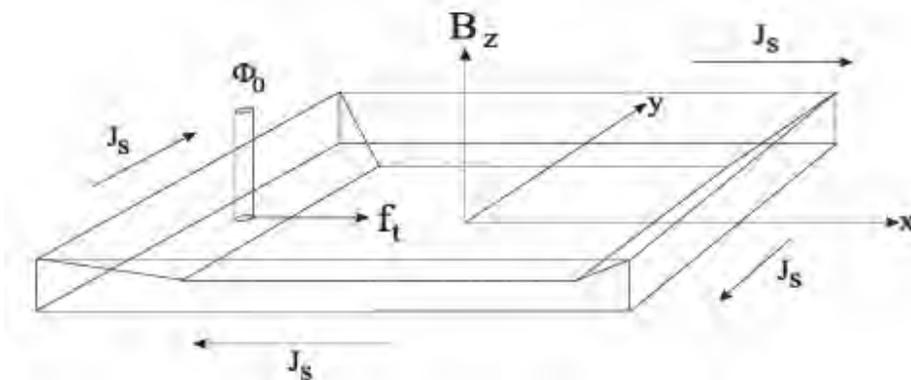
yang ditunjukkan pada gambar (7.28), tetapi garis fluks tidak akan bergerak sampai gaya de-pinning dari pusat pinning terlampaui.

Dari definisi rapat arus kritis pada persamaan (38) dan (40) terlihat bahwa hal tersebut dapat dikaitkan dengan gradien maksimum dari kerapatan fluks

$$J_z = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial B}{\partial x} \Big|_{max} \quad (7.89)$$

### Diamagnetisme

Respon superkonduktor terhadap medan eksternal yang diberikan adalah munculnya arus super yang bersirkulasi seperti yang ditunjukkan pada gambar (7.28). Arus ini dapat dibayangkan mengalir dalam suatu kumparan sehingga akan menghasilkan medan dengan arah yang berlawanan dan besar yang sama dengan medan eksternal. Bahan dengan sifat ini disebut diamagnetik sempurna dan karena kerapatan magnetisasi sampel menyeimbangkan medan eksternal, ini akan memberikan  $B = 0$  dalam bulk superkonduktor.



Gambar 7.28. Plot distribusi spasial dari fluks magnetik di dalam sebuah pinning pada superkonduktor tipe II setelah nilai medan magnet eksternal dari nol terus naik. Nilai rapat fluks magnetik sebesar  $B_z = \mu_0 H_{app}$  pada tepi sampel bergantung pada medan eksternal  $H_{app}$ , tetapi garis fluks dicegah memasuki pusat sampel karena adanya pinning. Medan magnet menurun dari  $\mu_0 H_{app}$  pada tepi menjadi  $B_z = 0$  dengan

slope yang merepresentasikan rapat arus kritis. Panah label  $J_s$  mengidentifikasi arah sirkulasi arus super disekitar tepi seperti yang diperoleh dari persamaan Maxwell  $\mu_0 J = \nabla \times B$ . Arus super yang bersirkulasi menyebabkan gaya dorong sebesar  $f_t = J \times \Phi_0$ . Gaya dorong ini dapat membawa garis fluks  $\Phi_0$  ke pusat sampel jika nilai gaya dorong melebihi gaya pinning.

$$B = \mu_0(H + M) = 0 \quad \Rightarrow M = -H \quad (7.90)$$

Kemampuan sampel superkonduktor untuk menscreen out/memfilter medan eksternal yang diberikan dapat dijelaskan oleh suseptibilitas  $\chi$  yang didefinisikan dengan  $M = \chi H$ . Nilai suseptibilitas  $\chi = -1$  diperoleh di bagian tengah sampel yang ditunjukkan pada gambar (7.28) karena pengecualian fluks dan  $\chi$  meningkat menuju 0 saat mendekati tepi sampel.

Evaluasi gaya levitasi superkonduktor akibat medan eksternal dapat ditentukan dari persamaan (25)) dengan magnetisasi lokal diberikan oleh

$$M = \frac{B}{\mu_0} - H \quad (7.91)$$

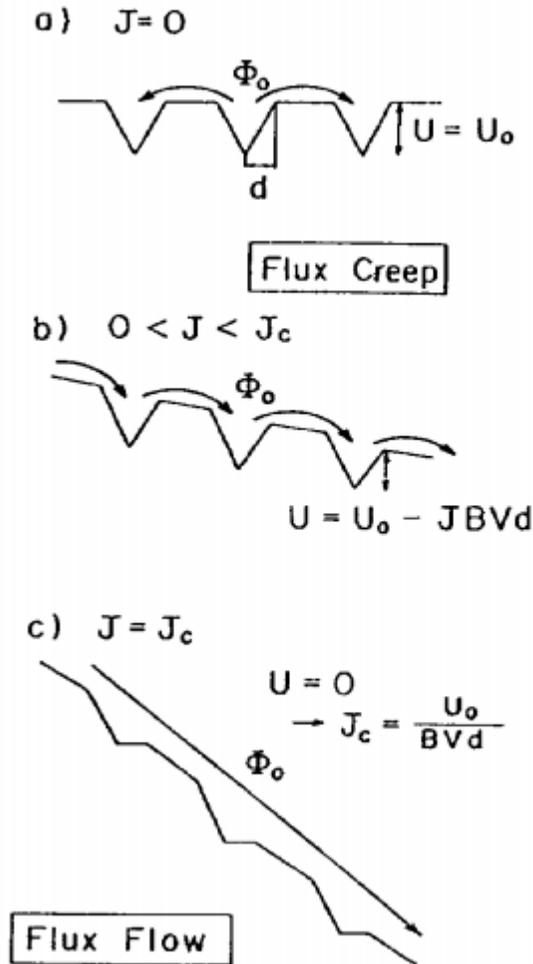
yang dapat dihitung dari model yang menggambarkan sifat pinning superkonduktor. Model pinning paling sederhana dikenal sebagai model Bean [Ref 2], di mana kerapatan arus kritis diasumsikan konstan di seluruh sampel. Pada kasus ini kerapatan fluks akan berkurang secara linier dari tepi sampel dan dengan kemiringan merepresentasikan rapat arus kritis seperti yang ditunjukkan pada gambar (7.28). Model yang lebih rumit akan memperhitungkan ketergantungan kerapatan fluks lokal.

### **Fluks Creep Dan Flow**

Kesetabilan termal dari pinning garis fluks dapat dianalisis dengan mengasumsikan sebuah garis fluks  $\Phi_0$  yang dipinning dalam sumur potensial yang berukuran  $d$  dan kedalaman  $U_0$  seperti yang ditunjukkan gambar 7.29. Garis fluks dapat melompat ke pinning

berikutnya akibat proses aktivasi termal dimana frekuensi lompatan  $f_j$  yang diberikan oleh

$$f_j = f_0 \exp \exp \left( -\frac{U}{k_B T} \right) \quad (7.92)$$



Gambar 7.29 a) Aktivasi termal fluks creep antar pinning yang berukuran  $d$  dan kedalaman  $U = U_0$ . b) Peningkatan fluks creep dari kiri ke kanan yang disebabkan oleh arus transport  $J$ . c) transisi ke daerah fluks flow ketika pinning menjadi tidak efektif akibat arus transport.

Dimana  $f_0$  adalah frekuensi lompatan ketika energi termal lebih besar dari energi potensial pinning  $k_B T \gg U$ .

Arus transport atau gradien fluks dalam superkonduktor akan meningkatkan fluks creep karena gaya per satuan panjang  $f_t = J \times \Phi_0$  (37) bekerja pada garis fluks. Gaya yang diberikan oleh gradien energi potensial akan memiliki slope konstan

$$\frac{-dU}{dx} = f_t l = J\Phi_0 l \Rightarrow U(x) = U_0 - J\Phi_0 l x = U_0 - JBVx \quad (7.93)$$

Dimana  $l$  adalah panjang garis fluks,  $V$  adalah volume garis fluks  $V = al$  dan fluks kuantum diberikan oleh kerapatan rata-rata fluks magnetik  $B$  dan area/luas garis fluks  $\Phi_0 = Ba$ . Gambar 7.29b menunjukkan perubahan energi potensial secara linier yang disebabkan oleh  $J$ . Pinning (kedalaman sumur potensial) nilainya berubah. Dari persamaan 45, dapat ditunjukkan kedalaman sumur pada sisi kiri akan naik sebesar  $\Delta V(-d) = U(-d) - U_0 = JBVd$  dan sisi kanan akan turun sebesar  $\Delta V(+d) = U(+d) - U_0 = -JBVd$ . Kemudian fluks creep/rambatan fluks dari kiri ke kanan akan meningkat akibat arus transport. Gambar 7.29c menunjukkan transisi dari flux creep/rambatan fluks ke daerah flux flow dimana pusat pinning tidak lagi efektif. Ini memberikan defenisi baru dari rapat arus kritis  $J_c$  berdasarkan sifat fisis dari pinning.

$$\Delta U(+d) = -J_c BVd = -U_0 \quad (7.94)$$

$$J_c = \frac{U_0}{BVd} = \frac{U_0}{\Phi_0 ld} \quad (7.95)$$

Persamaan (47) menunjukkan bahwa kedalaman awal sumur per satuan panjang dari garis fluks ( $\frac{U_0}{l}$ ) harus diperbesar atau mengurangi ukuran sumur ( $d$ ) untuk meningkatkan kerapatan arus kritis.

Analisis di atas menunjukkan bahwa setiap distribusi fluks tidak seragam pada superkonduktor tipe-II, dan perlahan akan meluruh

menghasilkan distribusi yang lebih seragam akibat mekanisme creep jika suhu cukup tinggi atau jika nilai gradien flux besar.

### **Sejarah**

Keadaan superkonduktor pada superkonduktor tipe-II yang memiliki pusat pinning, tidak akan reversibel terhadap medan eksternal yang diberikan karena fluks yang terperangkap di pusat pinning. Ini berarti bahwa sifat levitasi superkonduktor pada suhu dan medan eksternal tertentu dalam diagram fase yang ditunjukkan pada gambar (7.26), akan bergantung pada medan dan suhu saat fasa superkonduktor memasuki fase normal. Terdapat tiga fenomena mendasar akibat pengaruh dari nilai medan eksternal dan suhu ketika

1. Pendinginan dibawah  $T_c$  tanpa medan magnet eksternal dan kemudian perlahan diberikan medan magnet eksternal (pendinginan tanpa medan)
2. Pendinginan di bawah  $T_c$  dengan medan eksternal konstan (pendinginan dengan medan)
3. Pendinginan pada suhu konstan dengan medan  $H > H_{c2}$  dan kemudian medan diturunkan sampai  $H < H_{c2}$ .

Prosedur pendinginan tanpa medan akan menyebabkan superkonduktor menjadi bahan diamagnetik di mana garis flux dengan pinning yang kuat dicegah bergerak. Namun garis fluks akan perlahan memasuki superkonduktor akibat flux creep dan gaya levitasi superkonduktor akan berkurang secara perlahan seiring waktu. Superkonduktor yang dioperasikan dalam mode ini harus kembali didinginkan dalam kondisi tanpa medan eksternal untuk mempertahankan gaya levitasi yang konstan.

Pendinginan dalam pengaruh medan magnet eksternal akan menghasilkan distribusi garis flux yang sangat homogen pada

---

sampel superkonduktor karena medan magnet terdistribusi dalam garis fluks di yang terjebak pada pinning (defect) ketika  $T < T_c$  dan akan terus terjebak ketika suhu semakin menurun. Jika medan magnet eksternal dipertahankan konstan, maka semua garis flux akan berada dalam keseimbangan yang stabil. Gaya levitasi superkonduktor dari pendinginan dengan medan magnet akan lebih stabil daripada superkonduktor yang didinginkan tanpa medan, karena gradien flux akan lebih kecil. Peningkatan stabilitas ini sangat diinginkan untuk aplikasi bearing/bearing praktis.

Saat transisi keadaan superkonduktor berlangsung dengan menurunkan medan sampai  $H < H_{c2}$  (lihat gambar 7.26) pada suhu konstan, akan menghasilkan garis flux terjebak pada lokasi pinning g. Garis flux tetap akan terjebak dalam pinning ketika medan eksternal menurun menuju nol yang akan menghasilkan gradien medan yang besar. Dengan cara ini superkonduktor akan memiliki sifat yang sama dengan magnet permanen, tetapi dengan kekuatan yang lebih besar beberapa Tesla dibandingkan dengan magnet permanen konvensional terkuat saat ini (0.5 T). Distribusi garis flux yang diperoleh dengan prosedur ini (penurunan nilai medan eksternal) tidak akan berada dalam keseimbangan dan berubah terhadap waktu karena proses *flux creep*.

### **Superkonduktor Suhu Tinggi (SKST)**

Dari penemuan superkonduktor tahun 1911 sampai 1986 suhu kritis tertinggi yang dicapai adalah  $T_c = 23 K$  untuk superkonduktor tipe II,  $Nb_3Ge$ . Suhu kritis ini sesuai dengan batas atas dari model Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) yang memberikan pemahaman mikroskopik dari fenomena superkonduktivitas berkenaan dengan interaksi yang dimediasi fonon. Kegembiraan sangat besar ketika diperoleh  $T_c = 35 K$  untuk material keramik  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  pada

---

tahun 1986. Hanya satu tahun kemudian  $T_c = 93\text{ K}$  dicapai untuk  $YBa_2Cu_3O_{6+x}$  dan jelas bahwa superkonduktor baru ini tidak dapat dijelaskan oleh model BCS. Superkonduktor ini disebut superkonduktor suhu tinggi karena superkonduktor ini melanggar teori BCS berkaitan dengan batas suhu kritis.

Fenomena superkonduktivitas suhu tinggi masih disebabkan oleh pembentukan pasangan Cooper, tetapi akibat dua hole/lubang dan bukan dua elektron. Sampai saat ini masih belum ada penjelasan mikroskopik dari mekanisme pasangan hole, tetapi jelas bahwa interaksi BCS yang dimediasi fonon bukanlah jawabannya.  $T_c$  tertinggi dilaporkan sebesar  $T_c = 1333\text{ K}$  untuk  $Hg_{0.8}Pb_{0.2}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ .

Semua superkonduktor suhu tinggi (SKST) adalah superkonduktor tipe-II dan memiliki medan kritis atas  $H_{c2}$  dalam kisaran beberapa ratus Tesla, yang pada prinsipnya memberikan peluang untuk mendapatkan medan magnet yang sangat besar dengan superkonduktor suhu tinggi ini. Juga kemungkinan untuk mendapatkan superkonduktivitas dengan pendinginan nitrogen cair pada suhu  $T = 77\text{ K}$ , memberikan pertimbangan ulang penggunaan superkonduktor secara komersial, karena harga nitrogen cair jauh lebih murah dari helium cair. Salah satu faktor terbatasnya penggunaan SKST adalah sulitnya mekanisme pinning garis fluks dan untuk mengurangi fluks creep seperti yang didiskusikan sebelumnya.

### **Bearing Superkonduktor**

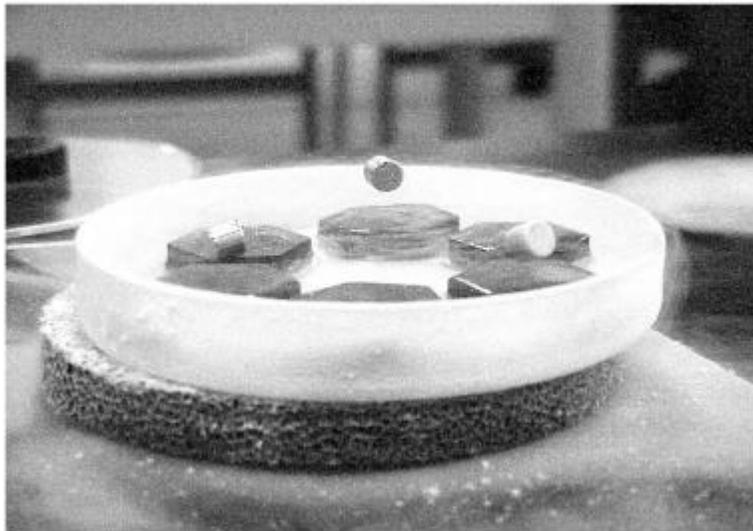
Aplikasi SKST sebagai bearing r didasarkan pada kemampuan superkonduktor tipe II untuk menjebak atau menolak medan magnet luar dengan mekanisme pinning garis fluks pada sampel

---

superkonduktor. Desain sederhana bearing superkonduktor dijelaskan berikut ini

### **Desain Dasar**

Konfigurasi bearing yang paling sederhana mirip dengan percobaan demonstrasi levitasi SKST di mana magnet permanen kecil ditempatkan di atas superkonduktor. Gambar (7.30) menunjukkan tiga magnet NdFeB melayang di atas beberapa sampel  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  yang didinginkan dengan nitrogen cair. Magnet ditempatkan di atas superkonduktor setelah proses pendinginan tanpa medan magnet eksternal di mana medan magnet dari magnet permanen ditolak oleh superkonduktor sehingga menimbulkan gaya levitasi yang dapat mengatasi gravitasi.



Gambar 7.30 Levitasi dari magnet permanen NdFeB di atas superkonduktor suhu tinggi  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  yang didinginkan dengan nitrogen cair

Sebuah pertanyaan mendasar adalah bagaimana agar teorema Earnshaws tidak dipenuhi. Jika medan eksternal dari magnet ditolak/dielakkan sepenuhnya oleh superkonduktor maka tidak akan ada komponen medan yang tegak lurus terhadap permukaan

superkonduktor. Medan magnet seperti itu dapat digambarkan ketika dua magnet permanen dengan kutub-kutub yang sama saling berhadapan seperti ditunjukkan pada gambar (7.18). Oleh karena itu respons superkonduktor terhadap medan magnet dapat digambarkan seperti proses penciptaan medan dari magnet. Medan ini akan berputar jika magnet permanen diputar dan ketidakstabilan akibat kemiringan seperti yang diuraikan sebelumnya dapat dihilangkan dengan mengganti magnet bawah pada gambar dengan superkonduktor. Namun tidak ada gaya yang dapat mencegah magnet permanen meluncur ke samping dan akhirnya menyebabkan magnet jatuh di tepi superkonduktor.

Stabilisasi terhadap gerakan menyamping dapat diperoleh jika beberapa medan dari magnet permanen dapat menembus superkonduktor sebagai garis fluks yang terjebak ke pusat pinning. Setiap gerakan magnet permanen akan menimbulkan perubahan medan yang akan cenderung mendistribusikan kembali garis fluks yang terperangkap dalam superkonduktor yang menyebabkan gaya akan untuk menstabilkan akan bekerja pada superkonduktor.

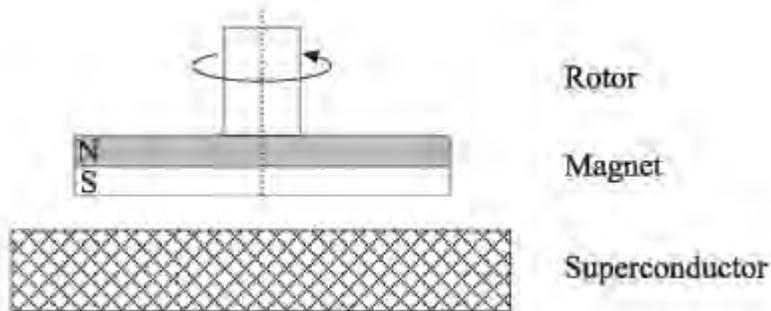
Analisis di atas menunjukkan bahwa untuk mengangkat benda yang berputar, maka harus dibuat bearing sedemikian rupa sehingga medan magnet tidak berubah oleh rotasi. Ini hanya dilakukan dengan memilih sumbu simetri dari medan magnet sebagai sumbu rotasi benda.

### **Gaya Levitasi**

Bearing magnet-superkonduktor yang ditunjukkan pada gambar (7.31) adalah bearing superkonduktor paling sederhana yang terdiri dari rotor magnet permanen dan superkonduktor yang diletakkan di bawah untuk mengangkat rotor. Sumbu simetri dari

---

magnet permanen adalah vertikal sehingga sumbu rotasi juga dalam arah vertikal.



Gambar 7.31 Bearing superkonduktor sederhana yang terdiri dari magnet permanen dan superkonduktor yang diletakkan di bawah untuk memberikan gaya levitasi pada rotor.

### Pendinginan Bearing Tanpa Medan

Dapat diestimasi gaya levitasi dari bearing superkonduktor magnetik yang didinginkan tanpa medan dengan pemodelan superkonduktor sebagai magnet seperti yang dijelaskan sebelumnya dan mengevaluasi gaya antar dua dipol magnetik.

Gaya antara dua dipol magnetik dari momen dipol  $m_1$  dan  $m_2$  yang dipisahkan oleh jarak  $r$  antar pusat massa diberikan oleh

$$F = -\frac{3\mu_0 m_1 m_2}{2\pi r^4} \quad (7.96)$$

Karena superkonduktor dapat diasumsikan seperti sebuah magnet dan dengan mengasumsikan kerapatan magnetisasinya  $M$ , dengan menseting  $m_1 = m_2 = MAL$ . Area/luas magnet dinotasikan dengan  $A$  dengan panjang  $L$ , memberikan

$$F = -\frac{3\mu_0 M^2 A^2 L^2}{2\pi r^4} \quad (7.97)$$

Gaya levitasi maksimum per satuan luas dapat dievaluasi dengan menggerakkan dipol saling mendekat secara bersamaan sehingga saling menyentuh. Hal ini sama dengan mengeset  $r = L$ . Dengan

mendefinisikan luas area magnet  $A = \pi \frac{D^2}{4}$  dengan  $D$  adalah diameter, maka

$$\frac{F}{A} = -\frac{3}{8}\mu_0 M^2 \left(\frac{D}{L}\right)^2 = 8Ncm^2 \quad (7.98)$$

Perhitungan persamaan (50) diperoleh dengan nilai rapat magnetisasi untuk magnet NdFeB adalah  $M = 4 \times 10^5 Am^{-1}$  ( $B_{permukaan}=0.5 T$ ) dan nilai diameter per satuan panjang telah disertakan. Nilai ini sedikit lebih rendah dari limit tekanan magnetik/gaya magnetik pada diskusi sebelumnya. Ini disebabkan karena perhitungannya telah melibatkan geometri bearing.

Perhitungan di atas didasarkan pada asumsi tanpa ada fluks yang masuk pada sampel, ini bergantung pada gaya fluks pinning dan rapat arus kritis. Dari hasil yang diperoleh, dapat dihitung jarak dimana proses screening/penyaringan medan terjadi (persamaan 41). Dengan mengasumsikan rapat arus konstan, maka

$$\frac{\partial B}{\partial x} = \mu_0 J_c \Rightarrow B(x) = B(0) - \mu_0 J_c x \quad (7.99)$$

Denga menseting  $B(x)$ , maka dapat ditentukan panjang/ jarak peluruhan medan

$$l = \frac{B(0)}{\mu_0 J_c} \quad (7.100)$$

Jika panjang  $l$  kecil dibandingkan ukuran sampel maka fluks tidak masuk pada sampel superkonduktor. Superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_7$  yang memiliki  $J_c = 5 \times 10^7 Am^{-2}$  pada  $B = 0.5 T$  dimana  $B(0) = 0.5 T$  akan terfilter pada jarak  $l = 8mm$  yang nilainya cukup besar dibanding jarak aplikasi praktis bearing.

Analisis perhitungan di atas diperoleh berdasarkan keadaan tidak adanya fluks yang masuk pada superkonduktor, sehingga

superkonduktor harus didinginkan tanpa medan. Ini berarti bahwa magnet dan rotor pada gambar (7.31) harus terangkat/tidak menyentuh superkonduktor sebelum superkonduktor didinginkan dan kemudian disetting kembali ke posisi yang sesuai ketika sampel memasuki keadaan superkonduktor. Syarat ini cukup memperumit konstruksi praktis bearing superkonduktor dan sebagian besar studi superkonduktor berkaitan dengan sifat levitasi superkonduktor selama proses pendinginan.

### **Pendinginan Bearing dengan Medan**

Perhitungan gaya levitasi dari superkonduktor yang didinginkan dalam pengaruh medan eksternal akan sangat sulit dibanding dengan perhitungan tanpa melibatkan fluks seperti yang sudah dibahas sebelumnya. Model pinning sederhana akan diuraikan berikut ini untuk memfokuskan konsep dasar fisika dari gaya levitasi superkonduktor yang didinginkan dalam pengaruh medan eksternal.

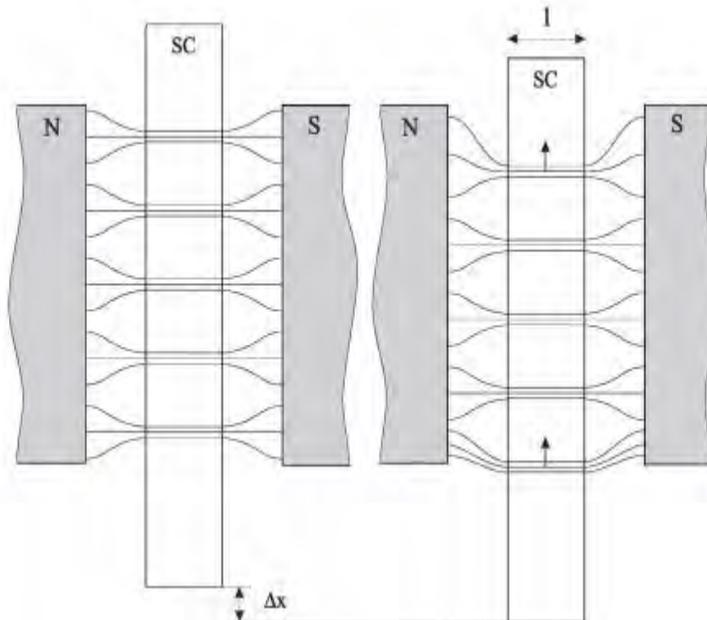
Gambar (7.32) menunjukkan superkonduktor yang didinginkan dengan medan luar berasal dari dua kutub magnet yang berbeda. Medan ini akan masuk melalui celah udara. Medan magnet tersebut akan masuk dalam superkonduktor sebagai garis fluks ketika superkonduktor didinginkan di bawah suhu kritis seperti yang ditunjukkan pada sisi kiri. Diasumsikan bahwa superkonduktor dipertahankan dalam posisi yang tetap selama pendinginan dengan support mekanik. Sisi kanan gambar menunjukkan apa yang terjadi jika superkonduktor dipindahkan sejauh  $\Delta x$ . Hanya bagian superkonduktor yang mengarah tepat pada celah terbuka akan mengalami medan yang berbeda dan keadaan ini menghasilkan gaya yang cenderung mendistribusikan kembali garis fluks. Gaya ini akan mengarah ke atas dan bekerja

---

pada garis fluks tetapi pinning akan mencegahnya bergerak sehingga menghasilkan gaya levitasi yang mengarah ke atas.

Dengan mengasumsikan bahwa setiap garis fluks dapat mensupport gaya yang diberikan dengan gaya pinning maksimum dan bahwa gaya total adalah jumlah dari gaya pinning pada setiap garis flux sehingga dapat dievaluasi gaya pada superkonduktor dengan mengintegrasikan kerapatan gaya pinning terhadap volume di mana medan magnet berubah akibat perpindahan superkonduktor. Gaya pinning maksimum per satuan panjang garis flux diberikan oleh persamaan (38) dan rapat gaya pinning  $f_{pd}$  dirumuskan dalam besaran fluks kuantum,  $\Phi_0$  yang diperoleh dari perkalian rapat fluks magnetik rata-rata dengan area  $A$  garis fluks  $\Phi_0 = BA$

$$f_p = J_c \Phi_0 = J_c BA \Rightarrow f_{pd} = \frac{f_p}{A} = J_c B \quad (7.101)$$



Gambar 7.32. Kiri: superkonduktor yang didinginkan dengan medan luar dihasilkan dari dua magnet permanen yang masuk melalui celah udara. Fluks magnetik dalam superkonduktor terkonsentrasi dalam garis fluks ketika sampel memasuki fasa superkonduktor. Kanan: Distorsi dari medan magnet karena pergerakan superkonduktor saat garis fluks dipinning. Gaya yang mengarah ke atas akan bekerja pada bagian atas dan bawah garis fluks. Nilai rapat garis fluks pada bagian atas rendah sedangkan nilai rapat garis fluks pada bagian bawah tinggi dibandingkan pada tepi celah udara. Pinning garis fluks mencegahnya bergerak sehingga akan menghasilkan gaya levitasi yang mengarah ke atas. Garis fluks pada pusat celah udara tidak terpengaruh oleh pergerakan superkonduktor, karena medan magnet tidak berubah.

Total gaya pada superkonduktor diperoleh dengan mengintegrasikan rapat gaya dalam volume  $V_f$  dimana medan magnetik tidak berubah terhadap pergeseran.

$$F = - \int_{V_f} f_{pd} dV = -J_c B V_f \quad (7.102)$$

Dengan asumsi rapat gaya pinning bernilai konstan. Volume dimana medan berubah akan sebanding dengan pergeseran  $\Delta x$ , panjang garis fluks  $l$  dan ukuran superkonduktor  $w$  ( $V_f = lw\Delta x$ ) maka diperoleh

$$F = -J_c B l w \Delta x \quad (7.103)$$

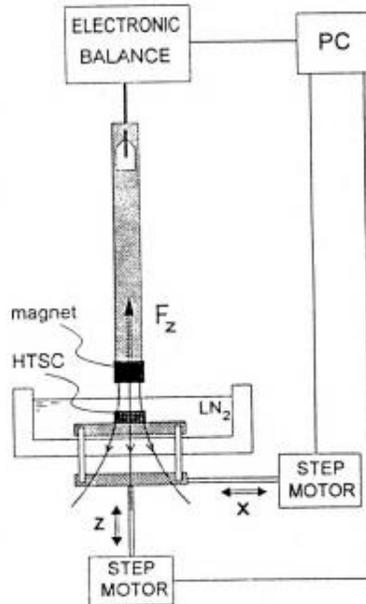
Dengan mendefinisikan luas area superkonduktor yang tegak lurus terhadap arah gaya diasumsikan sebagai area/luas bearing  $A_B = lw$ , maka dapat dihitung gaya bearing per area/luas bearing dan pergeseran dengan  $J_c = 5 \times 10^7 \text{ Am}^{-2}$  dan  $B = 0.5 \text{ T}$  maka diperoleh

$$\frac{F}{A_B \Delta x} = J_c B = 2.5 \text{ Ncm}^{-2} \text{mm}^{-1} \quad (7.104)$$

Model di atas sangat sederhana karena interaksi garis fluks dan de-pinning tidak disertakan. Garis fluks akan saling tolak menolak dan gaya pada satu garis fluks dapat terkopel dengan pinning dari garis fluks terdekat (tetangga). Hasil ini menyebabkan relasi gaya non lokal dan perhitungan gaya levitasi melibatkan penyelesaian model pinning 3D yang memberikan distribusi medan magnetic di dalam superkonduktor dimana penurunan gaya dari persamaan 25 diaplikasikan. Seringkali persamaan harus diselesaikan tersendiri.

### **Studi Literatur**

Banyak studi awal dari bearing superkonduktor didesain untuk sistem kecil yang hanya terdiri dari sebuah superkonduktor dan sebuah magnet permanen yang digunakan sebagai rotor. Pengujian gaya levitasi pada rotor yang berotasi cukup sulit, karena gaya gravitasi tidak berubah secara kontinu selama eksperimen. Banyak studi dari gaya levitasi dilakukan pada sistem stasioner, gaya levitasi diukur dengan menyeimbangkan magnet. Gambar 7.33 meneunjukkan pengukuran statis.



Gambar 7.33. Setting untuk mengukur pergeseran statis bergantung pada gaya levitasi antara magnet permanen yang dipasang dalam keadaan seimbang dan superkonduktor bergerak dalam arah x-z

Peningkatan dari nilai rapat arus kritis akan meningkatkan gaya levitasi duperkonduktor seperti yang diperlihatkan dari persamaan 52 dan 56. Pengembangan sampel superkonduktor untuk aplikasi bearing menjadi penting. Grup riset di Forschungszentrum Karlsruhe mendapatkan hasil yang cukup baik untuk sampel  $YBa_2Cu_3O_7$  dan diperoleh gaya levitasi sebesar  $18 \text{ Ncm}^{-2}$  untuk superkonduktor yang didinginkan tanpa medan luar dan  $4,1 \text{ Ncm}^{-2}$  untuk superkonduktor yang didinginkan menggunakan magnet permanen  $B=0,45 \text{ T}$  berdiameter 25 mm.

Peningkatan besar gaya levitasi superkonduktor diperoleh sampel  $YBa_2Cu_3O_x$  melalui proses oksigenisasi selama 10 jam pada suhu  $450^\circ\text{C}$ . [Ref 30]. Peningkatan ini berkorelasi dengan peningkatan kadar oksigen x pada permukaan  $YBa_2Cu_3O_x$  dan menuju nilai optimum  $x=1$ .

Studi yang menganalisis perhitungan gaya levitasi untuk geometri yang lebih kompleks dan deskripsi pinning telah dilakukan. Efek ukuran superkonduktor dan magnet diberikan pada referensi [31] dan gaya levitasi dari magnet ditempatkan di atas ring superkonduktor dibahas pada referensi [32]. Studi keduanya didasarkan pada deskripsi Meissner. Perhitungan yang lebih kompleks diberikan pada referensi [33,34,35,36] yang didasarkan pada model pinning yang lebih rumit untuk menggambarkan superkonduktor dan skema solusi elemen berhingga diperlukan untuk menyelesaikan persamaan sistem.

### **Stiffness**

Diskusi pendahuluan pada bab ini menyatakan bahwa tidak ada gaya pemulih yang dapat mencegah magnet bergerak ke samping saat terjadi kasus penolakan fluks total meskipun pinning pada garis fluks menghasilkan gaya pemulih seperti yang digambarkan persamaan 55 untuk geometri sederhana, gambar 7.32. Stiffnes/kekakuan didefinisikan oleh persamaan 1 dan pada geometri sederhana ini adalah positif yang dirumuskan sebagai berikut

$$\kappa = J_c B l w \quad (7.105)$$

Orde kekakuan per luas bearing adalah ukurannya sama seperti pada persamaan (56).

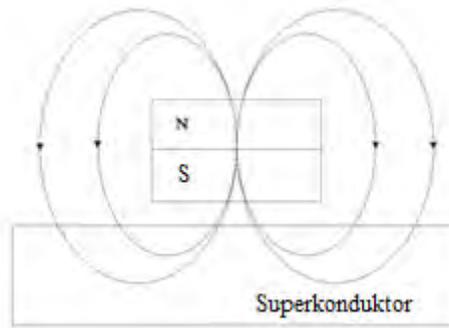
Perhitungan kekakuan dari geometri bearing yang ditunjukkan gambar 7.31 lebih sulit karena distribusi medan dinyatakan dalam 3 dimensi. Gambar 7.34 menunjukkan secara kualitatif bagaimana distribusi garis medan magnetik terlihat sebelum pendinginan. Distribusi medan setelah pendinginan akan menghasilkan garis fluks melengkung dengan geometri yang sama dalam fasa superkonduktor.

---

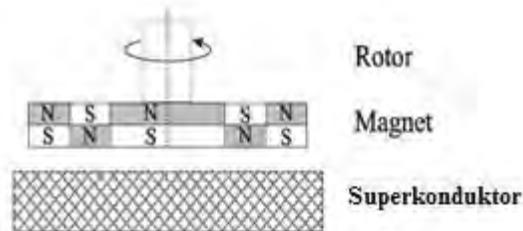
Seluruh garis fluks dengan komponen dalam bidang horizontal akan mencegah pergerakan magnet permanen pada arah vertikal karena pinning garis fluks. Pada kasus pergerakan horizontal dari seluruh garis fluks magnet dengan komponen vertikal akan mencegah ini. Kemudian kekakuan dari bearing akan menjadi positif dalam arah  $x$ ,  $y$  dan  $z$  yang bertentangan dengan magnetik bearing dimana teorema Earnshaws diaplikasikan.

Aplikasi magnet multipole digunakan untuk meningkatkan kekakuan dari bearing superkonduktor. Gambar 7.35 menunjukkan sebuah desain yang akan menyebabkan redistribusi dari garis fluks tidak hanya pada tepi magnet, tetapi juga di bawah magnet dalam kasus perpindahan horizontal.

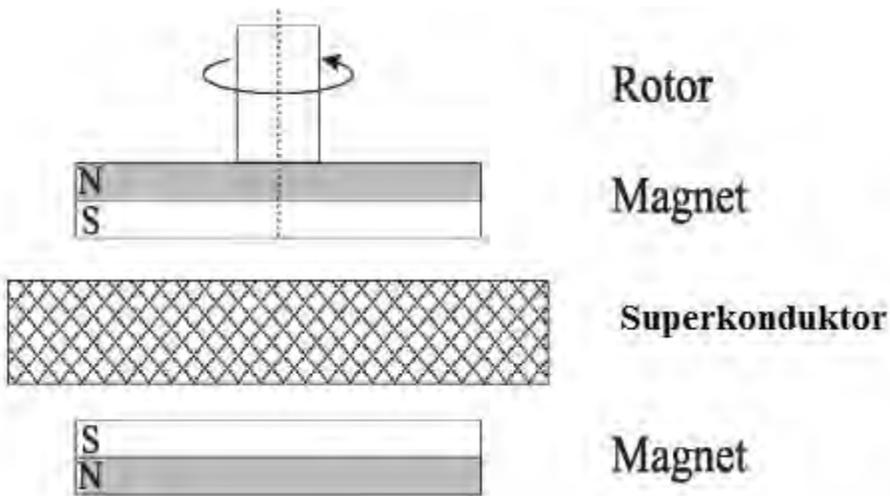
Sebuah konfigurasi alternatif didesain dengan menggunakan *bearing hybrid* magnet-superkonduktor. Gambar 7.36 menunjukkan *bearing hybrid* yang terdiri dari dua magnet yang mensuplai gaya levitasi bearing dan sebuah lempengan superkonduktor diantara magnet untuk menstabilisasi bearing dengan memberikan kekakuan yang positif dalam arah  $x$ ,  $y$  dan  $z$ . Kekakuan bearing dapat diatur dengan mengubah jumlah superkonduktor yang diposisikan di antara magnet. Satu keuntungan dari bearing hybrid adalah gaya levitasi tetap ada ketika superkonduktor dalam keadaan  $T > T_c$ . Kemudian support untuk rotor dalam mode nonrotasi hanya untuk mempertahankan rotor tetap pada posisinya dan tidak mensupport seluruh massa rotor.



Gambar 7.34 Distribusi medan magnet pada sebuah bearing magnet superkonduktor sebelum superkonduktor didinginkan dengan medan luar. Garis fluks dengan geometri yang sama dihasilkan ketika superkonduktor didinginkan dibawa suhu transisi superkonduktor.



Gambar 7.35. Bearing magnet superkonduktor yang dikonstruksi dari magnet multipole untuk meningkatkan kekakuan bearing



Gambar 7.36. Bearing hybrid magnetk-superkonduktor dimana gaya levitasi dihasilkan oleh gaya tolak menolak dari dua magnet permanen dan stabilisasi diperoleh dari fluks pinning pada lempeng superkonduktor yang diposisikan di antara magnet.

## Literatur

Banyak studi mengenai kekakuan bearing superkonduktor yang telah dilakukan dengan set up yang sama seperti gambar 7.33. Kekakuan dalam orde  $10^{-3} - 10^{-1} \text{ Nmm}^{-1}$  dan  $10^{-2} - 5 \times 10^{-1} \text{ Nmm}^{-1}$  telah diperoleh untuk masing-masing pegeseran superkonduktor secara vertikal dan horizontal. Kesesuaian yang baik antara model dan eksperimen diperoleh dengan menggambarkan superkonduktor ini dengan model pinning Bean. Hasil yang sama dilaporkan pada referensi [ Ref 3; 4].

Peningkatan kekakuan bearing sampai 5 kali terjadi ketika menggunakan konfigurasi bearing multipol untuk roda gila bermassa 300 gr yang ditunjukkan pada referensi [Ref 5]. Studi *bearing hybrid* diungkapkan pada referensi [Ref 6; 7].

Nilai kekakuan yang besar dari superkonduktor film tipis  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  dengan ketebalan  $0,3 \mu\text{m}$  dilaporkan pada referensi [Ref 8]. Hal ini menjadikan film tersebut digunakan sebagai elemen stabilisasi dalam aplikasinya.

## Koefisien Gesekan

Gambar (7.37) menunjukkan eksperimen untuk menganalisis kerugian bearing roda gila ketika rotor magnet permanen diangkat di atas superkonduktor suhu tinggi yang didinginkan oleh cairan nitrogen [1]. Perangkat penyanggah pada sisi kanan digunakan untuk menempatkan superkonduktor sebelum superkonduktor didinginkan dalam pengaruh medan eksternal. Ketinggian levitasi yang berkisar 3 dan 9 mm diperoleh untuk rotor bermassa 320 gram dengan melepas perangkat penyanggah setelah superkonduktor didinginkan. Pancaran gas nitrogen disuntikkan ke dalam ruang vakum melalui tabung di sebelah kiri untuk memutar rotor. Dengan mengukur penurunan kecepatan putaran

---

sebagai fungsi dari waktu maka dapat ditentukan kerugian bearing dan koefisien gesekan dengan menggunakan persamaan (5).

Ada tiga penyebab adanya kerugian pada bearing supekonduktor

1. Gaya viskos yang disebabkan oleh sisa gas dalam ruang vakum
2. Pembentukan panas di daerah konduksi di sekitar magnet yang berputar disebabkan oleh arus induksi pusaran.
3. Kerja yang dilakukan dengan menggerakkan garis fluks yang dipinning dalam superkonduktor.

Gaya mekanik dari sisa gas dalam ruang vakum merupakan mekanisme yang memberikan kerugian paling besar dan harus dikurangi dengan mempertahankan tekanan dalam chamber/ruang di bawah  $10^{-4}$  mbar untuk mengurangi kerugian instrinsik dalam bearing superkonduktor.

Arus pusaran induksi akan muncul dalam material konduktor berotasi ketika medan magnet dalam konduktor berubah-ubah terhadap waktu. Dari persamaan Maxwell dapat dihitung potensial listrik induksi akibat medan magnet yang berubah terhadap waktu pada area sebuah konduktor

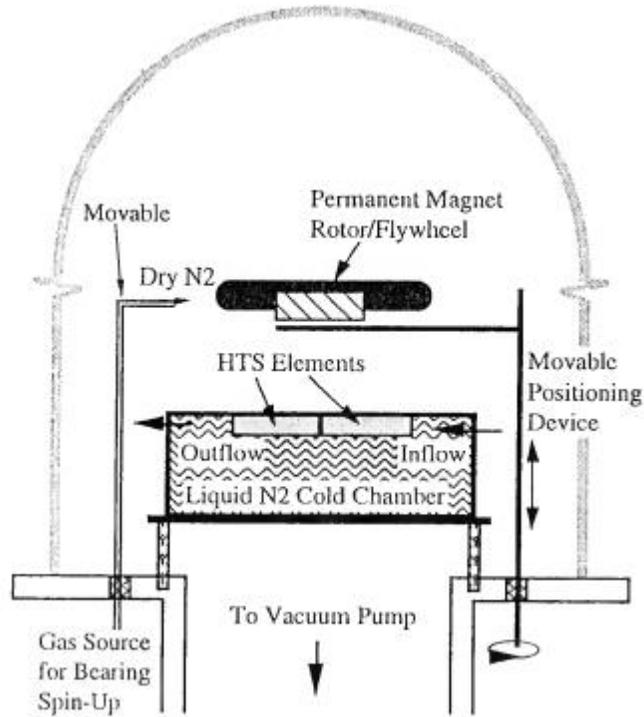
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (7.106)$$

$$\int_{area} \nabla \times E dS = -\int_{area} \frac{\partial B}{\partial t} dS \quad (7.107)$$

$$U = \int_{area} E dl = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (7.108)$$

Persamaan di atas dihitung untuk magnet dengan jari-jari  $r$  yang bergerak dengan kecepatan  $v$  sepanjang permukaan plat konduktor maka akan diperoleh

$$U = -\frac{B\pi R^2}{2r} = \frac{\pi Brv}{2} \quad (7.109)$$



Gambar 7.37 Set up eksperimen untuk menentukan kerugian dalam bearing magnetic-superkonduktor. Rotor magnet diposisikan di atas superkonduktor dengan menggunakan perangkat penyanggah yang ditunjukkan pada sisi kanan sebelum superkonduktor didinginkan di bawah suhu kritis. Ketika superkonduktor didinginkan, perangkat dipindahkan dan pancaran gas nitrogen dihasilkan dari tabung yang ditunjukkan sisi kiri untuk perputaran awal rotor. Kerugian kemudian dievaluasi dengan mengukur pengurangan kecepatan rotasi sebagai fungsi waktu. Dari set up tersebut diperoleh koefisien gesekan  $10^{-6}$ .

Kehilangan kemudian dihitung dari hukum Ohm

$$P = RU^2 = \frac{RB^2r^2v^2}{4} \quad (7.110)$$

Dimana  $R$  adalah resistansi konduktor sepanjang keliling kutub magnet. Jika plat konduktor berotasi, maka kecepatan  $v$  akan sebanding dengan kecepatan angular plat  $\omega$ ,  $v = R_{plat}\omega$ .

Dari hasil perhitungan di atas menunjukkan bahwa volume dari bearing material konduktor harus dibuat sekecil mungkin.

Ketika garis fluks yang terpinning bergerak di antara defect/pusat pinning, kerja dilakukan pada sistem dan sebagian energi akan hilang. Sebelumnya telah ditunjukkan bahwa redistribusi garis fluks pada superkonduktor hanya terjadi ketika magnet bergerak dan disimpulkan bahwa ketidaksimetrian medan magnet dari magnet permanen akan menyebabkan kerugian pada superkonduktor. Hal yang sama ketika sumbu rotasi mekanik magnet bergerak terhadap sumbu simetri medan magnet atau vibrasi mekanik dalam bearing membuat posisi magnet berosilasi.

Mekanisme kerugian yang disebutkan di atas akan menimbulkan kerugian energi per rotasi dari magnet permanen dimana kerugian akan bertambah secara linier terhadap kecepatan rotasi. Nilai kerugian ini konstan terhadap waktu, tetapi akibat fluks creep (penjalaran fluks) dapat berubah sebagai fungsi dari kecepatan rotasi. Masalah mekanisme kerugian dalam bearing superkonduktor masih terus diinvestigasi.

### **Literatur**

Koefisien gesekan dalam orde  $10^{-6}$  saat kecepatan  $v_r = R\omega = 17 \text{ ms}^{-1}$  diperoleh dengan diameter bearing  $R = 89 \text{ mm}$  yang ditunjukkan gambar 7.37 [Ref. 9]. Penurunan gesekan diperoleh dengan mengganti baja tahan karat dari cryochamber nitrogen cair dengan komposit fiberglass/epoksi yang menyebabkan kerugian berkurang.

Optimasi parameter material dan geometri bearing berkaitan dengan kerugian yang diperoleh pada referensi [ Ref.10].

Kerugian histeresis dalam superkonduktor telah dijelaskan menggunakan model Bean dan telah ditunjukkan bahwa kerugian histeresis sebanding dengan kecepatan rotasi sedangkan kerugian arus pusaran sebanding dengan kuadrat kecepatan putaran [Ref. 11].

Metode pengukuran standar untuk karakterisasi superkonduktor adalah mengukur respon magnetik superkonduktor ketika terekspos medan magnet bolak-balik. Metode ini disebut suseptibilitas a.c. dan kerugian ditentukan dengan metode pengukuran yang sama seperti saat magnet rotor menyebabkan perubahan medan magnet. Beberapa studi tentang relasi antara beberapa metode perhitungan kerugian telah dilakukan [Ref. 12]. Telah ditemukan bahwa batas butir dari keadaan superkonduktor mengakibatkan kerugian yang tinggi karena lemahnya pinning garis flux yang terperangkap di batas butir.

Pengurangan kerugian yang disebabkan oleh magnet yang tidak homogen telah diperoleh dengan menempelkan lembaran tipis bahan ferro-magnetik pada rotor magnet permanen untuk menghilangkan ketidakhomogenan yang dimiliki [Ref. 13].

### **Stabilitas Dinamik**

Tujuan dari analisis stabilitas dinamis adalah untuk menentukan apakah gerakan bearing stabil terhadap kemiringan dan perubahan posisi keseimbangan ketika rotornya berputar. Ini dapat ditentukan dengan menyelesaikan persamaan gerak yang melibatkan gaya magnet dan redaman yang disebabkan oleh superkonduktor atau arus pusaran induksi. Hubungan antara gaya magnet dan perpindahan akan menjadi non-linier seperti yang diperlihatkan persamaan (49) dan memiliki kopling antar arah yang berbeda. Sehingga gerakan bearing superkonduktor harus

---

dijelaskan oleh persamaan diferensial non-linier yang saling terkopel sehingga menghasilkan dinamika yang rumit seperti sebagai solusi yang menggambarkan chaos/kekacauan.

Solusi analitik untuk persamaan diferensial non-linier yang terkopel sangat jarang diperoleh dan pemecahan numerik atau analisis stabilitas gangguan dalam lingkungan untuk solusi steady-state harus diterapkan pada sistem guna menyederhanakan persoalan.

### **Literatur**

Teori gangguan telah diterapkan pada persamaan untuk menggambarkan gerak rotasi bearing sederhana dan telah terbukti memiliki ketidakstabilan yang divergen pada nilai kecepatan rotasi kritis tertentu [Ref 14]. Ketidakstabilan seperti itu telah diamati secara eksperimental di mana getaran mekanis eksternal dan resonansi mekanis internal masing-masing menyebabkan perubahan posisi kesetimbangan magnet dalam rotasi bearing [Ref 15].

### **Soal**

Dari bab aplikasi superkonduktor sebagai *magnetic bearing*, selesaikan permasalahan berikut ini

1. Jelaskan masalah dari bearing konvensional sehingga kita perlu mendesain *magnetic bearing* dari material yang bersifat superkonduktor?
2. Analisis kendala apa saja yang dihadapi dalam mendesain *bearing magnetic*?
3. Langkah apa saja yang harus dilakukan untuk menyelesaikan kendala yang dihadapi dalam proses mendesain *magnetic bearing*?

4. Analisis tahapan proses pabrikasi/sintesa superkonduktor dari senyawa pada sampel  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$
5. Bagaimana proses formasi pasangan Cooper menghasilkan fenomena superkonduktivitas dan jelaskan mengapa teori BCS memprediksikan bahwa fenomena superkonduktivitas tidak memungkinkan pada suhu di atas 30K?
6. Langkah apa saja yang harus dilakukan agar superkonduktor memiliki sifat sebagai magnet permanen dengan kekuatan yang besar sehingga levitasnya dapat dimanfaatkan sebagai bearing.
7. Uraikanlah desain magnetic bearing yang diaplikasikan pada sistem flywheel sederhana
8. Analisa perhitungan matematika dalam mendesain magnetic bearing yang diaplikasikan pada sistem *flywheel* sederhana
9. Apakah desain magnetic bearing pada sistem roda gila sederhana yang sudah dirancang dapat mengatasi persoalan pada bearing konvensional?
10. Dari rancangan *magnetic bearing*, jelaskan bagian mana yang paling baik dan bagian mana yang memerlukan perbaikan?

### **Daftar Pustaka**

1. S. Eamshaw. On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether. Trans. Camb. Phil. Soc., 7:97-112, 1842.
2. C.P. Bean. Magnetization of hard superconductors. Phys. Rev. Lett., 8(6):250-253, 1962.
3. H. Ishigaki, H. Ito, M. Itoh, A. Hida, and R. Takahata. Magnetic coupling by using levitation characteristics of YBCO superconductors. IEEE trans. superconductivity, 3(1):404-407, 1993.
4. S. Nagaya, N. Hirano, M. Takenaka, M. Minami, and H. Kawashima. Fundamental study on high-Tc superconducting

- 
- magnetic bearings for flywheel system. *IEEE trans. superconductivity*, 5(2):643-649, 1995.
5. M. Komori, A. Tsuruta, S. Fukata, and T. Matsushita. Superconducting bearing system using high Tc superconductors. *IEEE trans. superconductivity*, 5(2):634-637, 1995.
  6. K.B. Ma, C.K. McMichael, M.A. Lamb, and W.K. Chu. Application of high temperature superconductors on levitation bearings, torque transmissions and vibration dampers. *IEEE trans. superconductivity*, 3(1):388-391, 1993.
  7. J.R. Hull, E.F. Hilton, T. M. Mulcahy, Z.J. Yang, and A. Lockwood. Low friction in mixed- $\mu$  superconducting bearings. *J. Appl. Phys.*, 78(11):6833-6838, 1995.
  8. P. Schonhuber and F.C. Moon. Levitation forces, stiffness and force-creep in YBCO high-Tc superconducting thin films. *Applied Superconductivity*, 2(7/8):523-534, 1994.
  9. J.R. Hull, T.M. Mulcahy, K.L. Uherka, and R.G. Abboud. Low rotational drag in High-temperature superconducting bearing. *IEEE trans. superconductivity*, 5:626-629, 1995.
  10. Navau and A. Sanchez. Stability and losses of levitating superconducting disk and cylinders. *IEEE trans, superconductivity*, 7(2):920-923, 1997.
  11. M. Zeisberger and W. Gawalek. Losses in magnetic bearings. *Mat. Scin. Engineering B*, 53:193-197, 1998.
  12. Z. J. Yang and J. R. Hull. Energy loss in superconducting bearing systems. *IEEE trans, superconductivity*, 7(2):318-321, 1997.
  13. J. R. Hull, J.F. Labataille, T. M. Mulcahy, and J.A. Lockwood. Reduced hysteresis loss in superconducting bearings. *Appl. Supercond.*, 4(1/2):1-10, 1996.
  14. T. Sugiura, M. Tashiro, Y. Uematsu, and M. Yoshizawa. Mechanical stability of a high-tc superconducting levitation system. *IEEE trans. superconductivity*, 7(2):386-389, 1997.
  15. T. Hikihara, H. Adachi, S. Ohashi, Y. Hirane, and Y. Ueda. Levitation drift of flywheel and HTSC bearing system caused by mechanical resonance. *Physica C*, 291:34-40, 1997.
-

# BAB 8

## TERMODINAMIKA

### **Kompetensi Dasar**

Menelaah dan menerapkan pengetahuan mahasiswa dengan cakupan pengetahuan faktual, konseptual, prosedural, dan metakognitif pada materi kalor.

### **Tujuan Pembelajaran**

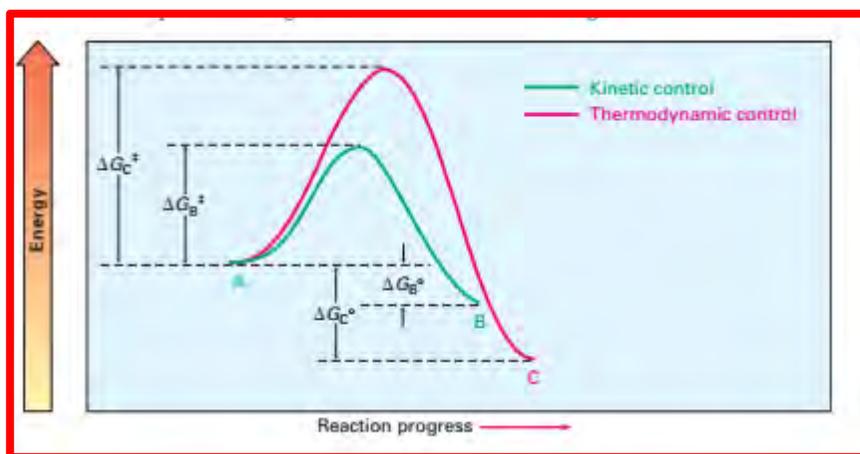
1. Mengolah informasi faktual dan konseptual dari konsep kalor dan kaitannya dengan ilmu Kimia.
2. Menyajikan pengetahuan prosedural dan metakognitif dari konsep kalor dan kaitannya dengan ilmu kimia
3. Menerapkan konsep kalor/termodinamika pada ilmu kimia melalui pendekatan STEM

### **Pendahuluan**

Reaksi 1,3-butadiena dengan HBr pada temperatur 0 °C menghasilkan 71% senyawa 3-bromo-1-butena dan 29 % senyawa 1-bromo-2-butena. Tetapi reaksi yang sama dilakukan pada 40 °C menghasilkan rasio produk campuran berubah menjadi 15% senyawa 3-bromo-1-butena dan 85% senyawa 1-bromo-2-butena. Begitu juga ketika campuran produk yang terbentuk pada 0 °C dipanaskan hingga 40 °C adanya HBr, rasio aduk perlahan berubah dari 71:29 menjadi 15:85. Mengapa?

Apakah suatu reaksi menguntungkan, dan sejauh mana akan berjalan sampai selesai menghasilkan produk dapat dinilai dari

tanda dan besarnya perubahan energy bebas Gibbs,  $G$ . Perubahan energi Gibbs yang memberi informasi tentang kecenderungan suatu reaksi disamping itu dari data termokimia diketahui perubahan panas yang menyertai reaksi kimia. Perubahan panas yang menyertai reaksi dapat dengan mudah ditentukan secara eksperimental dengan mengukur perubahan suhu yang terkait. Pengaruh suhu pada distribusi produk dapat ditinjau dari kecepatan dan keseimbangan. Bayangkan sebuah senyawa A dapat menghasilkan salah satu atau keduanya dari dua produk, B dan C. Jika B terbentuk lebih cepat dari C (dengan kata lain,  $\Delta G^\ddagger_B < \Delta G^\ddagger_C$ ) maka pada suhu relative rendah B lebih mudah terbentuk. Tetapi C lebih stabil daripada B (dengan kata lain,  $\Delta G^\circ_C < \Delta G^\circ_B$ ), maka untuk reaksi yang sama pada suhu yang lebih tinggi kedua proses yang mudah reversibel dan keseimbangan tercapai. Karena C adalah lebih stabil dari B, maka C adalah produk utama yang diperoleh. Produk dari reaksi kesetimbangan bergantung pada stabilitas, bukan pada laju relatif. Reaksi seperti itu dikatakan berada di bawah kendali kesetimbangan, atau kendali termodinamika.



Gambar 8.1 Diagram Energi dimana produk B lebih cepat terbentuk sedangkan produk C lebih stabil

Contoh penting dari reaksi yang menguntungkan secara termodinamika adalah konversi intan menjadi grafit, intan secara termodinamika tidak stabil dibandingkan grafit (arang). Untungnya transformasi berlangsung sangat lambat pada suhu dan tekanan kamar.



Kontrol suatu produk reaksi dilakukan dengan memperhatikan kondisi reaksi yang diatur melalui suatu reaktor. Bahan kimia diproduksi di reaktor kecil dengan skala beberapa ton. Reaktor kimia adalah suatu tempat berlangsungnya reaksi kimia. Perancangan suatu reaktor kimia harus mengutamakan efisiensi kinerja reaktor, sehingga didapatkan hasil produk yang yang diinginkan, dengan kapasitas besar dan biaya minimum, baik itu biaya modal maupun operasi. Tentu saja faktor keselamatan pun tidak boleh dikesampingkan. Biaya operasi biasanya termasuk besarnya energi yang akan diberikan atau diambil, harga bahan baku, upah operator, dll. Perubahan energi dalam suatu reaktor kimia bisa karena adanya suatu pemanasan atau pendinginan, penambahan atau pengurangan tekanan, gaya gesekan (pengaduk dan cairan), Konsentrasi senyawa ( $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ , Koefisien perpindahan panas ( $h, U$ ), dll



Gambar 8.2 Contoh reaktor sederhana

Termodinamika merupakan bagian dari cabang Fisika yang mempelajari hubungan antara energi dan usaha dari suatu sistem. Termodinamika hanya mempelajari besaran-besaran yang berskala besar (makroskopis) dari sistem yang dapat diamati dan diukur dalam eksperimen. Besaran-besaran yang berskala kecil (mikroskopis) dipelajari dalam Teori Kinetik Gas (*Kinetic Theory of Gas*) atau Fisika Statistik (*Statistical Physics*). Termodinamika juga dapat diartikan sebagai ilmu yang menjelaskan besaran fisis tertentu yang menggambarkan sikap zat di bawah pengaruh kalor.

### **Sistem dan Lingkungan**

Dalam termodinamika, memahami tentang definisi sistem dan lingkungan sangatlah penting. Sistem adalah bagian segala sesuatu yang dijadikan sebagai fokus pengamatan. Sedangkan lingkungan adalah luar dari sistem berpengaruh terhadap sistem. Sistem adalah sejumlah zat yang dibatasi oleh dinding tertutup. Yang dimaksud dengan zat di sini dapat berupa zat padat, cair atau gas, dapat pula dipol magnet, energi radiasi, foton dan lain-lain. Dinding yang membatasi sistem dengan lingkungan dapat

dinyatakan nyata atau imajiner, dapat diam atau bergerak, dapat berubah ukuran atau bentuknya. Contohnya ialah dalam reaksi antar urea dan air di dalam sebuah botol tertutup, maka air dan urea di dalam botol tersebut disebut sebagai sistem dan segala yang di luar dinding botol disebut sebagai lingkungan. Suatu sistem dengan lingkungannya disebut dengan semesta (universe). Berdasarkan hal tersebut, sistem dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu:

1. Sistem Terisolasi, yaitu jika energi dan materi antara sistem dengan lingkungan tidak dapat dipertukarkan.
2. Sistem Tertutup, yaitu jika energi antara sistem dan lingkungan dapat dipertukarkan tapi materi tidak dapat menembus sistem tersebut.
3. Sistem Terbuka, jika energi dan materi dapat dipertukarkan antara sistem dan lingkungan

Sistem ditandai dengan empat besaran, yaitu komposisi, volume, tekanan dan temperatur. Kuantitas yang empat ini disebut sebagai koordinat makroskopik. Ciri umum atau sifat skala besar dari sistem pada umumnya dapat dinyatakan dengan kuantitas tersebut.

### **Kesetimbangan (Hukum Termodinamika Ke Nol)**

Hukum ke-nol termodinamika secara sederhana dapat dikatakan, “Sistem yang berada dalam kesetimbangan termal pada suhu yang sama”. Hukum ke-nol termodinamika memperhitungkan bahwa suhu adalah sesuatu yang dapat diukur untuk memprediksi apakah panas akan berpindah antar benda atau tidak, terlepas dari bagaimana objek berinteraksi. Bahkan jika dua benda tidak berada dalam kontak fisik, panas masih dapat mengalir di antara

---

mereka, dengan cara perpindahan panas secara radiasi. Contohnya pada termometer air raksa, saat suhu dinaikkan air raksa akan memuai karena luas tabung adalah konstan maka terjadi kenaikan tinggi air raksa. Dengan kata lain kenaikan ketinggian air raksa ini menunjukkan terjadinya perubahan suhu. Hukum ke-nol termodinamika menyatakan bahwa, jika sistem berada dalam kesetimbangan termal, tidak ada aliran panas yang akan terjadi. Contoh lain dari hukum ke-nol termodinamika adalah ketika terdapat dua gelas air, satu gelas berisi air panas dan gelas lainnya berisi air dingin. Jika kedua gelas diletakkan di meja selama beberapa jam akan terjadi kesetimbangan termal dengan suhu ruangan.

Hukum ini penting untuk perumusan matematis termodinamika atau lebih tepatnya untuk menyatakan definisi matematis suhu. Hukum ini banyak digunakan untuk membandingkan suhu benda yang berbeda. Jika kita ingin mengukur suhu yang akurat, diperlukan benda referensi dan karakteristik tertentu dari benda itu yang berubah dengan suhu. Perubahan karakteristik itu dapat dianggap sebagai indikasi perubahan suhu. Karakteristik yang dipilih itu dikenal sebagai sifat termodinamika.

### **Suhu dan Kalor**

Suhu merupakan ukuran atau derajat panas atau dingin dari suatu material relatif terhadap keadaan material tersebut. Sifat suatu benda yang dapat diukur dan besar nilainya bergantung kepada suhu benda tersebut. Misalkan panjang suatu batang logam, tekanan uap boiler, kemampuan kawat mengalirkan listrik, kemampuan suatu semikonduktor sebagai konduktor. Konsep suhu sangat berhubungan dengan energi kinetik dari molekul- molekul penyusun suatu benda atau suatu sistem.

---

Termometer adalah alat yang dipakai untuk mengukur suhu. Termometer ada beberapa jenis yaitu: termometer badan, termometer laboratorium, termometer lingkungan dan lain- lain sesuai dengan pemanfaatannya. Termometer yang digunakan mempunyai beberapa skala diantaranya skala Celcius, Kelvin, Reamur dan Fahrenheit.

#### Konversi Suhu

$$T^{\circ}K = T^{\circ}C + 273.15 K$$

$$T^{\circ}F = \frac{9}{5} T^{\circ}C + 32^{\circ}F$$

Kalor didefinisikan sebagai perpindahan energi antara sistem dan lingkungannya karena perbedaan suhu. Panas atau kalor bukanlah suatu materi, karena tidak dapat diukur massanya. Berat suatu benda padat pada suhu lebih rendah sama dengan beratnya pada saat tersebut bersuhu lebih tinggi. Contoh lain jika sebuah logam salah satu ujungnya dipanaskan pada awalnya suhu antara ujung satu dengan yang lain akan terjadi berbeda. Jika dipanaskan terus maka ujung lainnya lama menjadi panas juga walaupun tidak dipanaskan. Terjadi aliran panas dari satu ujung ke ujung yang lain menunjukkan bahwa kalor bukanlah suatu materi. Suhu yang tinggi pada suatu benda akan mempengaruhi gerak molekul benda tersebut. Energi gerak tersebut dapat berupa gerak tranlasi, rotasi atau vibrasi. Sebaliknya jika suhu benda diturunkan maka gerak molekulnya semakin kecil, jika terus diturunkan sampai molekul sampai ambang batas gerak atau diam saat itu secara fisika dikatakan bersuhu 0 °K atau -273°C.

Energi Termal suatu benda bergantung pada jumlah molekul dan komposisi, serta suhu benda. Jika dua zat yang memiliki suhu

---

berbeda ditempatkan dalam suatu tempat, akibat pergerakan antara molekul terjadi tabrakan. Dalam tabrakan ini, ada sejumlah energi panas ditransfer. Energi panas ditransfer dari zat yang lebih panas ke yang lebih dingin. Perpindahan panas antara benda terus berlanjut sampai benda tersebut berada pada suhu yang sama. Saat objek berada pada suhu yang sama dikatakan berada dalam kesetimbangan termal. Kesetimbangan termal adalah kesetimbangan dinamis saat tumbukan antar molekul terus berlanjut untuk mentransfer energi panas. Pelepasan dan penyerapan panas dari kedua material tersebut dapat berlangsung dengan 3 cara yaitu: konduksi, konveksi dan radiasi.

1. Konduksi : sebatang logam dipanaskan pada ujung tertentu maka akan terjadi perambatan panas ke ujung lainnya. Peristiwa ini dikenal dengan konduksi. Proses cepat atau lambatnya panas suatu bahan tergantung dari sifat bahan logam itu. Dalam istilah fisiknya dikenal konduktor dan isolator.
2. Konveksi, perpindahan kalor dengan cara ini lebih banyak terjadi pada peristiwa pemanasan fluida (zat cair). Perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya sirkulasi panas dalam material yang dipanaskan sehingga menyebabkan terjadinya perubahan kerapatan material itu.
3. Radiasi, contoh peristiwa radiasi adalah perpindahan panas oleh cahaya matahari ke bumi. Peristiwa perpindahan panas secara radiasi tidak memerlukan medium.

Besaran yang berkaitan dengan kalor di antaranya adalah:

1. Kapasitas Kalor adalah jumlah panas yang diperlukan oleh benda itu untuk menaikkan suhunya 1 °K. Kapasitas kalor memiliki satuan JK<sup>-1</sup>.

Secara matematis di tuliskan:

$$C = \Delta Q / \Delta T \quad 8.1$$

$\Delta T$  adalah kenaikan suhu yang disebabkan oleh panas sebesar  $Q$ .

2. Kalor jenis adalah adalah kalor atau panas yang diperlukan oleh setiap kilogram zat untuk menaikkan suhunya sebesar 1 °C. Satuan kalor jenis zat adalah  $\text{J Kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Dari kalor jenis zat ini dapat juga dihitung jumlah atau banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhunya sebanding dengan massa dan perubahan suhu zat itu.

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \quad 8.2$$

Sebagai contoh, nilai kapasitas kalor jenis air adalah  $4186 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  pada  $15 \text{ } ^\circ\text{C}$ , dan untuk es, nilai kapasitas kalor jenisnya adalah  $2072 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  pada suhu  $-5 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Satuan SI untuk kalor adalah joule, karena kalor juga merupakan energi. Satuan lain untuk kalor adalah kalori yang masih digunakan secara luas.

Kalor Laten ( $L$ ) adalah kalor yang digunakan untuk mengubah fasa material. Material dapat berubah fasanya jika melepas dan menerima panas. Nilai  $L$  bergantung pada sifat perubahan fasa, serta bergantung pada sifat materialnya. Kalor laten fusi  $L_f$  adalah istilah yang digunakan saat terjadi perubahan fasa dari padat menjadi cair (peleburan) dan panas laten penguapan  $L_v$  adalah istilah yang digunakan saat perubahan fasa dari cair ke gas. Secara matematis ditulis

$$Q = mL$$

8.3

Di mana  $m$  adalah massa materi dan  $L$  adalah panas laten untuk perubahan fasa materi. Kata laten artinya tersembunyi, dan digunakan saat terjadi perubahan fasa materi. Saat terjadi perubahan fasa, suhu tidak berubah. Ini berarti bahwa suhu air tidak naik sampai semua es mencair. Nilai  $L$  berbeda untuk setiap jenis perubahan fasa, dan bergantung pada suhu.

Kalor fusi,  $L_f$  energi yang dibutuhkan untuk mengubah 1 kg zat dari padat menjadi cair.  $L_v$  adalah kalor penguapan, yaitu energi yang dibutuhkan untuk mengubah 1 kg zat dari cair menjadi uap.

Beberapa zat bisa langsung berubah dari fase padat ke fase uap, untuk kondisi ini digunakan - kalor sublimasi,  $L_s$ .

Tanda  $Q$  bernilai positif ketika energi masuk ke dalam sistem dan negatif ketika energi keluar dari sistem. Nilai kalor laten yang merepresentasikan perubahan fasa bergantung pada suhu.

Misalnya untuk air pada suhu  $100^\circ\text{C}$ , kalor laten penguapan adalah  $2256,3 \text{ kJ kg}^{-1}$ . Pada suhu yang lebih rendah, Antara  $0^\circ\text{C}$  dan  $100^\circ\text{C}$  (dengan  $T$  dalam Celcius)

$$L_v = 2500 - 2,269T - 0,00164T^2$$

Contoh soal:

Dua benda diketahui suhu awal dan massanya. Keduanya saling bersentuhan secara langsung dan setelah beberapa saat mencapai keseimbangan termal. Berapa suhu akhir benda tersebut?

Solusi: Energi panas berpindah dari benda yang lebih panas ke benda yang lebih dingin hingga mencapai kesetimbangan termal (suhu kedua benda sama). Benda kehilangan energi panas sebesar:

$$Q_h = -m_h c_h \Delta T_h$$

Energi yang diterima benda dingin adalah

$$Q_c = -m_c c_c \Delta T_c$$

Dengan asumsi benda terisolasi sehingga tidak ada transfer energi antara objek dan lingkungan sekitar, maka energi yang hilang oleh benda panas harus sama dengan energi yang diterima oleh benda dingin sehingga

$$Q_c = -Q_h$$

Ketika kedua benda akhirnya mencapai kesetimbangan termal, keduanya harus memiliki suhu akhir yang sama:

$$T_{h,final} = T_{c,final} = T_f$$

jadi

$$-m_h c_h = (T_f - T_h) = m_c c_c (T_f - T_c)$$

Kita dapat mengatur ulang ini untuk menemukan rumus untuk  $T_f$ :

$$-m_h c_h T_f + m_h c_h T_h = m_c c_c T_f - m_c c_c T_c$$

$$T_f (m_h c_h + m_c c_c) = m_h c_h T_h + m_c c_c T_c$$

$$T_f = \frac{m_h c_h T_h + m_c c_c T_c}{m_h c_h + m_c c_c}$$

**Usaha/Kerja**

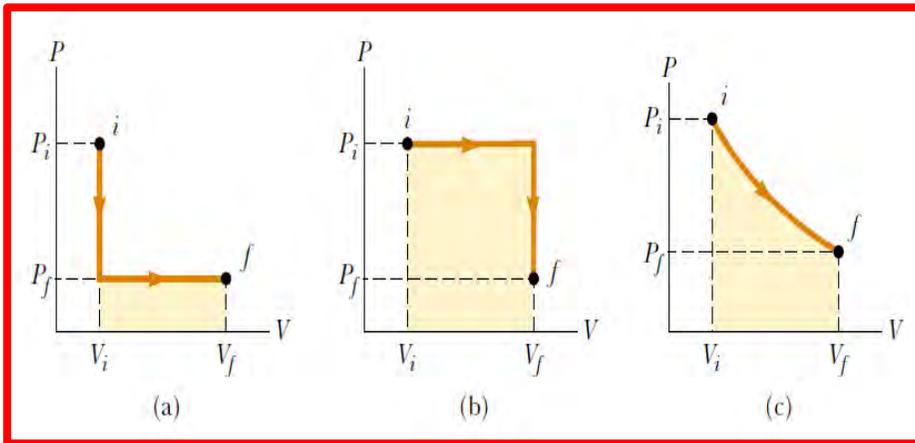
Kerja /usaha (W) adalah aksi dari suatu sistem ketika sistem tersebut diberikan gaya. Usaha yang dilakukan gas pada gambar 8.1. menunjukkan suatu gas di dalam silinder tertutup dengan piston (penghisap) yang dapat bergerak bebas tanpa gesekan. Pada saat gas memuai, piston akan bergerak naik sejauh  $\Delta s$  . Apabila luas piston adalah A, maka usaha yang dilakukan gas untuk menaikkan piston adalah gaya  $F$  dikalikan jarak  $\Delta s$  . Gaya yang dilakukan oleh gas merupakan hasil kali tekanan P dengan luas piston A, sehingga:

$$W = F.S \tag{8.4}$$

$$W = P.A.S \tag{8.5}$$

karena  $A.\Delta s = \Delta V$ , maka

$$W = P.\Delta V \text{ atau } W = P(V_2 - V_1) \tag{8.6}$$



Gambar 8.1. Usaha pada proses termodinamika yang direpresentasikan dalam diagram PV

**1. Usaha pada proses isokhorik**

---

Isokhorik adalah proses termodinamika yang tidak mengubah nilai volume sistem ( $\Delta V=0$ ). Pada proses ini, nilai usaha adalah 0 karena tidak terdapat suatu luasan bangun pada diagram P-V.

$$V_1 = V_2 = V$$

$$W = P(V_2 - V_1) \quad 8.7$$

$$W = P(0) = 0$$

## 2. Usaha pada Proses isobarik

Proses isobarik adalah proses perubahan keadaan sistem pada tekanan konstan ( $\Delta P = 0$ ). Usaha dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$W = P \Delta V \quad 8.8$$

Dalam termodinamika, usaha bernilai positif (+) jika terjadi transfer energi keluar dari sistem: sistem melakukan usaha pada lingkungan (gas memuai  $V_2 > V_1$ ). Dan Usaha bernilai negatif (-), jika lingkungan melakukan usaha pada sistem (gas memampat  $V_2 < V_1$ ).

## 3. Usaha pada Proses Isotermal

Proses isotermal adalah suatu proses perubahan keadaan gas pada suhu tetap. Menurut Hukum Boyle, proses isotermal dapat dinyatakan dengan persamaan

$$PV = \text{konstan} \text{ atau } P_1V_1 = P_2V_2 \quad 8.9$$

Dalam proses ini, tekanan dan volume sistem berubah sehingga persamaan  $W = p \Delta V$  tidak dapat langsung digunakan, maka berlaku :

$$\int dw = \int pdV \quad 8.10$$

Pada gas ideal didefinisikan bahwa  $n$  adalah jumlah zat yang dinyatakan dalam satuan mol,  $R$  adalah konstanta gas, dan  $T$  adalah suhu. Relasi dari ketiga variabel tersebut direpresentasikan dalam persamaan gas ideal sebagai berikut:

$$W = n \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) \quad 8.11$$

#### 4. Usaha pada proses adiabatik

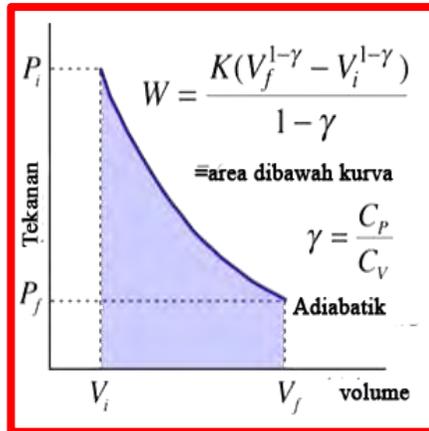
Proses adiabatik adalah suatu proses perubahan keadaan gas di mana tidak ada kalor ( $Q$ ) yang masuk atau keluar dari sistem. Proses ini dapat dilakukan dengan cara mengisolasi sistem menggunakan bahan yang tidak mudah menghantarkan kalor atau disebut juga bahan adiabatic, sedangkan bahan yang bersifat mudah menghantarkan kalor disebut bahan diatermik. Proses adiabatik ini memenuhi persamaan Poisson sebagai berikut

$$PV^\gamma = \text{konstan}$$

atau

$$P_i V_i^\gamma = P_f V_f^\gamma$$

$$T_i V_i^{\gamma-1} = T_f V_f^{\gamma-1}$$



Gambar 8.2. Adiabatik

Dengan  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  adalah konstanta Laplace, dan  $C_p$  adalah kapasitas kalor gas pada tekanan tetap dan  $C_v$  adalah kapasitas kalor gas pada volume tetap. Oleh karena sistem tidak melepaskan atau menerima kalor, pada kalor sistem proses adiabatik  $Q$  sama dengan nol. Dengan demikian, usaha yang dilakukan oleh sistem hanya mengubah energi dalam sistem tersebut. Besarnya usaha pada proses adiabatik tersebut dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$W = \frac{1}{\gamma - 1} (P_i V_i - P_f V_f) \quad 8.14$$

Dari kurva hubungan  $p - V$  tersebut, diperoleh kesimpulan:

- Kurva proses adiabatik lebih curam daripada kurva proses isothermal.
- Suhu, tekanan, maupun volume pada proses adiabatik tidak tetap

### **Energi dari Sistem (Hukum Termodinamika Pertama)**

Salah satu orang pertama yang menyatakan hukum kekekalan energi adalah dokter Jerman Robert Mayer (1814–1878). Pada

tahun 1840 Mayer adalah dokter, yang berlayar ke Hindia Timur. Saat berada di kapal, dia membaca pernyataan/pendapat ilmuwan Prancis Laurent Lavoisier yang mengemukakan bahwa panas yang dihasilkan oleh hewan disebabkan oleh pembakaran makanan yang lambat di tubuh mereka. Lavoisier lebih lanjut menyatakan bahwa makanan yang dibakar oleh tubuh lebih sedikit di lingkungan yang panas daripada di lingkungan yang dingin.

Energi kimia pada hewan diperoleh dari hasil oksidasi molekul makanan. Molekul gula, misalnya glukosa, mengalami oksidasi sesuai dengan reaksi berikut:



Setiap gram glukosa yang dicerna oleh tubuh, sebesar 3,81 kalori energi dilepaskan saat metabolisme. Nilai kalori per satuan berat berbagai makanan akan berbeda. Karbohidrat (gula dan pati) dan protein menghasilkan sekitar 4 kal/gr; lipid (lemak) menghasilkan 9 kal/gr, dan oksidasi alkohol menghasilkan 7 kal/gr.

Pernyataan paling umum dari hukum pertama termodinamika : “Kenaikan energi internal dari suatu sistem termodinamika sebanding dengan jumlah energi panas yang ditambahkan ke dalam sistem dikurangi dengan usaha yang dilakukan oleh sistem terhadap lingkungannya.” Pondasi hukum ini pertama kali dikemukakan oleh James Prescott Joule melalui eksperimen-eksperimennya yang berhasil menyimpulkan bahwa panas dan usaha saling terkait.

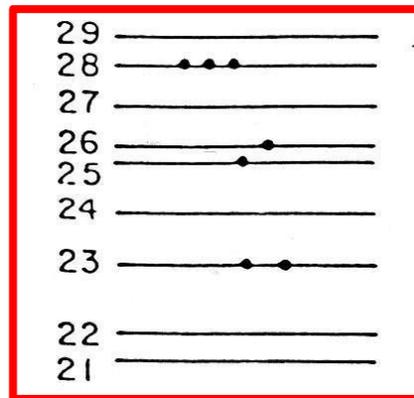
Gambar 8.4 menunjukkan beberapa tingkat energi di dalam sistem. Energi total dari sistem  $U$  adalah jumlah energi dari masing-masing partikel. Asumsikan bahwa semua partikel adalah sama dan tidak berinteraksi satu sama lain. Pada tingkat energi

---

tertentu di dalam sistem dan tiap-tiap level dapat ditempati oleh sejumlah partikel. Energi dari tingkat  $i$  disebut  $U_i$

.Energi Total,  $U$  adalah :

$$U = (2)(U_{23}) + (U_{25}) + (U_{26}) + (3)(U_{28})$$



**Gambar 8.4.** Tingkat Energi di dalam Sistem.

Anggap bahwa sistem terisolasi sehingga tidak kehilangan energi. Hal ini memungkinkan partikel berpindah ke tingkat energi yang berbeda, selama energi total tidak berubah. Untuk sistem dalam kesetimbangan, jumlah rata-rata partikel di setiap tingkat tidak berubah terhadap waktu.

Ada dua cara energi total dari sistem dapat berubah yaitu usaha (work) dapat dilakukan dari sistem ke lingkungannya dan panas dapat mengalir dari lingkungan ke sistem. Jika tidak ada usaha yang dilakukan, maka perubahan energi di dalam sistem:

$$\Delta U = Q \quad 8.15$$

( $W$ ) usaha yang di lakukan oleh sistem pada lingkungan,  $W$  akan bernilai positif, energi mengalir dari sistem ke lingkungan. Jika tidak ada aliran panas yang menyertainya, maka perubahan energi dari sistem adalah:

$$\Delta U = -W \quad 8.16$$

Energi sistem dapat berubah melalui mekanisme usaha yang dilakukan sistem dan aliran panas ke dalam sistem. Kekekalan energi pada kasus tersebut merupakan hukum termodinamika pertama.

$$\Delta U = Q - W \quad 8.17$$

Tingkat energi di dalam sistem ditentukan oleh beberapa sifat sistem. Untuk partikel gas di dalam kotak, tingkat energinya ditentukan oleh ukuran dan bentuk kotak. Untuk partikel dalam pengaruh medan listrik, tingkat energinya ditentukan oleh besar medan listrik.

Hukum pertama termodinamika, mengungkap hanya sebagian energi yang ditransfer ke sistem karena aliran panas dapat meningkatkan energi internal, dan usaha juga dapat dilakukan oleh sistem. Sebagai contoh, jika volume berubah, akan ada usaha yang dilakukan oleh sistem. Satu kasus khusus adalah kapasitas panas pada volume konstan,  $C_v$ . Dalam hal ini, tidak ada usaha  $p dV$  yang dilakukan oleh sistem dan  $\Delta U = \Delta Q$ , sehingga

$$C_v = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad 8.17$$

Banyak proses di dalam tubuh terjadi pada tekanan konstan, dan kapasitas panas pada tekanan konstan,  $C_p$ , tidak setara dengan  $C_v$ . Jika tekanan dan volume berubah selama proses, kapasitas panas tergantung pada perubahan tekanan dan volume.

Banyak reaksi kimia umum yang dilakukan pada tekanan konstan (misalnya dalam gelas kimia atau labu terbuka) dan dalam kondisi

ini, perpindahan panas,  $Q$ , sama dengan perubahan entalpi,  $H$ . Dengan kata lain perubahan entalpi  $\Delta H$  menyertai suatu reaksi adalah jumlah panas dibebaskan atau diserap sebagai reaksi berlangsung pada suhu tertentu,  $T$ , pada tekanan konstan. Satuan SI untuk entalpi,  $\Delta H$ , adalah joule,  $J$ . Biasanya, kita bekerja dengan besaran molar dan satuan  $\Delta H$  adalah  $J \text{ mol}^{-1}$  atau  $\text{kJ mol}^{-1}$ .

### **Hukum Termodinamika Kedua**

Secangkir kopi panas jika diletakkan dalam suatu ruangan, maka dengan sendirinya kopi tersebut akan menjadi dingin, tetapi kopi tidak dapat bertambah panas dalam sebuah ruangan yang dingin. Begitu juga jika saat suatu benda jatuh dari meja ke lantai, energi potensial diubah menjadi energi kinetik; kemudian, saat benda berhenti di tanah, energi kinetiknya diubah menjadi panas dan energi bunyi. Namun panas dari lantai tidak akan masuk ke dalam objek dan berubah menjadi energi kinetik yang menyebabkan benda melompat kembali ke atas meja. Benda yang rusak tidak dapat diperbaiki dengan sendirinya. Air tumpah tidak mengumpul kembali ke dalam wadah.

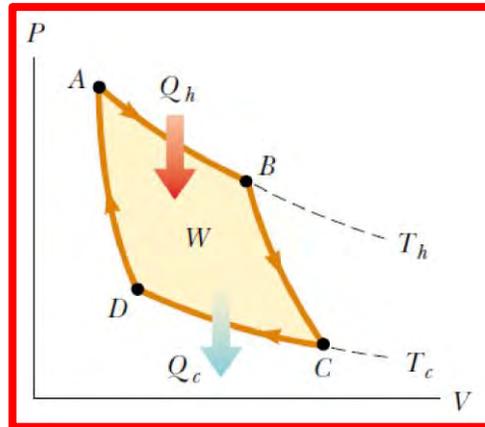
Ketidakmungkinan untuk mengubah seluruh panas menjadi tenaga mekanik merupakan pernyataan Hukum Termodinamika Kedua, yang dirumuskan Clausius dengan ungkapan: “Tidak mungkin untuk membuat sebuah mesin kalor yang berkerja dalam suatu siklus yang dapat memindahkan energi panas dari suatu benda dingin ke benda panas”. Dengan kata lain, energi tidak dapat diambil dari sumber dingin (suhu rendah) dan dipindahkan seluruhnya ke sumber panas (suhu tinggi) tanpa memberikan energi pada pompa untuk melakukan usaha. Proses spontan seperti aliran kalor dari panas ke dingin, difusi gas dari tekanan tinggi ke tekanan rendah, air mengalir dari tempat tinggi

---

ke rendah dan sebagainya terjadi tanpa adanya bantuan usaha dari luar dan biasanya prosesnya tidak dapat dibalik irreversible). Proses irreversible dapat terjadi dengan menggunakan alat bantu (mesin), seperti contoh pompa, kulkas dan AC (air conditioner).

Hukum Termodinamika Kedua oleh Kevin-Planck dinyatakan dengan ungkapan: “Tidak mungkin bagi sebuah sistem terjadi proses dimana system menyerap panas dari reservoir pada suhu tunggal dan mengubah panas seluruhnya menjadi usaha mekanik, sehingga sistem berada keadaan yang sama seperti keadaan awalnya”. Kalor mengalir secara alami dari benda yang panas ke benda yang dingin, kalor tidak akan mengalir secara spontan dari benda dingin ke benda panas, Kelvin – Planck telah merumuskan satu rumusan yang merupakan manifestasi dari hukum kedua termodinamika. Postulat Kelvin – Planck adalah rumusan hukum kedua termodinamika yang berlaku pada semua mesin panas: “Sebuah mesin yang bekerja dalam sebuah siklus tidaklah mungkin menerima panas dari sebuah reservoir termal lalu mengubah seluruh panas tersebut menjadi usaha”.

Pada tahun 1824, seorang insinyur berkebangsaan Prancis, Nicolas Leonardi Sadi Carnot, memperkenalkan metode baru untuk meningkatkan efisiensi suatu mesin berdasarkan siklus usaha. Metode efisiensi Carnot ini selanjutnya dikenal sebagai siklus Carnot. Siklus Carnot terdiri atas empat proses, yaitu dua proses isothermal dan dua proses adiabatik



Gambar 8.5. Siklus carnot (sumber Halliday)

Berdasarkan Gambar di atas siklus Carnot dijelaskan sebagai berikut :

1. Proses AB adalah pemuaiian isotermal pada suhu  $T_h$ . Pada proses ini sistem menyerap kalor  $Q_h$  dari reservoir bersuhu tinggi  $T_h$  dan melakukan usaha  $W_{AB}$ .
2. Proses BC adalah pemuaiian adiabatik. Selama proses ini berlangsung suhu sistem turun dari  $T_h$  menjadi  $T_c$  dan melakukan usaha  $W_{BC}$ .
3. Proses CD adalah pemampatan isotermal pada suhu  $T_c$ . Pada proses ini sistem menerima usaha  $W_{CD}$  dan melepas kalor  $Q_c$  ke reservoir bersuhu rendah  $T_c$ .
4. Proses DA adalah pemampatan adiabatik. Selama proses ini suhu sistem naik dari  $T_c$  menjadi  $T_h$  akibat menerima usaha  $W_{DA}$ .

Untuk mesin kalor, efisiensi mesin ( $\eta$ ) ditentukan dari perbandingan usaha yang dilakukan terhadap kalor yang diberikan. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\eta = \frac{W}{Q_h} \times 100\% = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} \times 100\% = 1 - \frac{Q_c}{Q_h}$$

Untuk siklus Carnot berlaku hubungan :

$$\frac{Q_c}{Q_h} = \frac{T_c}{T_h}$$

sehingga efisiensi mesin Carnot dapat dinyatakan sebagai:

$$\eta = 1 - \frac{T_h}{T_c} \times 100\%$$

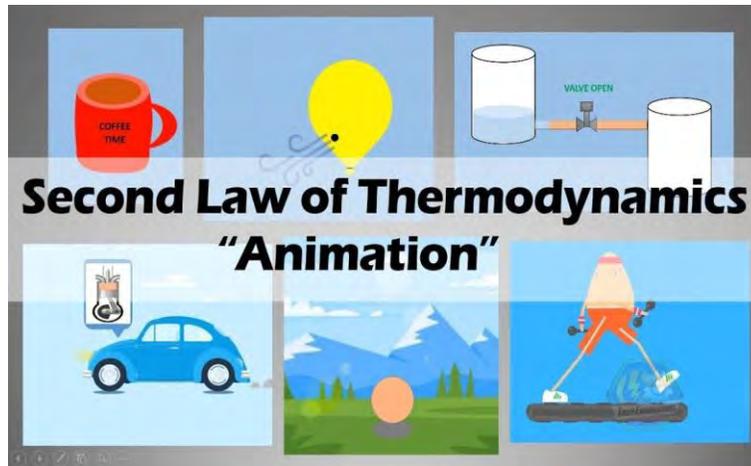
Dan akan berlaku :

$$\frac{Q}{T} = \text{konstan}$$

Nilai perubahan kecil dari panas ( $dQ_r$ ) dibagi dengan suhu mutlaknya ( $T$ ) dan hasil pembagian untuk seluruh proses dijumlah, maka untuk semua proses reversible, nilainya tetap.  $Q/T$  adalah merupakan fungsi keadaan; hanya tergantung kepada keadaan awal A dan keadaan akhir B. Kuantitas nilai dari perubahan  $Q/T$  disebut sebagai entropi ( $S$ ). Jika entropi keadaan A disebut  $S_A$  dan entropi keadaan B disebut  $S_B$  maka berlaku:

$$\frac{Q_r}{T} = S_A - S_B = \Delta S$$

Entropi adalah ukuran banyaknya energi atau kalor yang tidak dapat diubah menjadi usaha. Apabila sejumlah kalor  $Q$  diberikan pada suatu sistem pada suhu konstan, maka terjadi perubahan entropi sistem. Dengan bertambahnya panas pada sistem akan menyebabkan semakin besar gerakan molekul pada sistem (semakin tidak teratur), maka entropi disebut sebagai derajat ketidakteraturan. Semakin tinggi entropi suatu sistem menunjukkan sistem semakin tidak teratur. Entropi sama seperti halnya tekanan dan temperatur, yang merupakan sifat dari sifat fisis yang nilainya dapat diukur dari sebuah sistem.



**Gambar 8.6.** Hukum Termodinamika 2  
(<https://www.youtube.com/watch?v=w6VNUYIUUV3s>)

Hukum II Termodinamika juga menyatakan bahwa “total entropi suatu semesta adalah konstan atau tetap jika berlangsung proses reversibel dan total entropi suatu semesta akan bertambah jika berlangsung proses irreversibel”. Semakin tinggi entropi suatu sistem menunjukkan sistem semakin tidak teratur. Dapat dikatakan “Dalam suatu sistem tertutup, tanpa campur tangan dari luar ketidakteraturan akan selalu bertambah secara alamiah, proses akan cenderung ke arah tidak teratur”. Entropi dari sebuah sistem tertutup selalu naik, energi panas berpindah dari komponen yang bersuhu lebih tinggi ke komponen yang bersuhu lebih rendah. Pada suatu sistem yang panasnya terisolasi, entropi hanya berjalan satu arah.

Perubahan entropi alam semesta harus lebih besar dari nol untuk proses yang irreversibel dan sama dengan nol untuk proses reversibel. Jika entropi semesta mencapai nilai maksimum, maka suhu dan kerapatan alam semesta akan sama nilainya. Semua proses fisik, kimia, dan biologi akan berhenti karena tidak ada energi yang tersedia untuk melakukan usaha. Ini disebut sebagai kematian panas semesta.

### 1. Energi bebas Gibbs.

Pada posisi kesetimbangan tidak terjadi lagi perubahan laju reaksi. Jika dicampurkan  $N_2$  dan  $H_2$  dalam bejana saat mencapai kesetimbangan tidak akan terjadi lagi gas  $NH_3$ . Energi bebas Gibbs adalah suatu potensial termodinamika yang dapat digunakan untuk menghitung kerja reversibel maksimum yang dapat dilakukan oleh sistem termodinamika pada suhu dan tekanan konstan (isotermal, isobarik).

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pada kesetimbangan dengan besaran tetapan kesetimbangan adalah  $K$ ; nilai  $K > 1$  sesuai dengan perubahan negatif pada energi Gibbs,  $\Delta G^\circ$ , dan jika  $K < 1$ ,  $\Delta G^\circ$  positif. Perhatikan khususnya bahwa pada kesetimbangan, nilai perubahan energi Gibbs reaksi,  $\Delta G$  (bukan  $\Delta G^\circ$ ) sama dengan nol. Pada reaksi isotherm diberikan dalam persamaan:

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln K$$

$$0 = \Delta G^\circ + RT \ln K \quad \text{atau} \quad \Delta G^\circ = -RT \ln K$$

### Soal

1. Untuk massa yang sama, manakah yang menyebabkan luka bakar serius, air pada fasa cair bersuhu  $100^\circ C$  atau uap air bersuhu  $100^\circ C$ ?
2. Pernyataan berikut adalah tentang bagaimana manusia dapat melepaskan energi panas ke lingkungannya saat suhu udara lebih besar dari suhu tubuh,  $37^\circ C$ . Pernyataan yang mana benar?
  - a. Suhu tubuh yang dibiarkan naik sedikit selama beberapa jam tidak akan bermasalah pada fungsi organ tubuh.

- b. Kelenjar keringat mengeluarkan cairan ke permukaan kulit yang bersuhu lebih panas dari udara, sehingga kulit kemudian bisa didinginkan secara konveksi yaitu perpindahan panas ke udara sekitar yang lebih dingin.
  - c. Keringat tubuh seperti air menguap ke udara sekitarnya, asalkan tidak jenuh, dapat menghasilkan efek pendinginan di permukaan kulit
  - d. Tidak mungkin bagi tubuh untuk mentransfer energi panas ke lingkungan dalam kondisi ini jika kelembaban relatifnya adalah 100%
  - e. Tubuh tidak dapat menolak panas dalam kondisi ini, berapapun kelembaban relatifnya, jadi sebaiknya orang tersebut hanya minum air dingin supaya lebih dingin
3. Setelah minum sebotol yoghurt 150 gr, Bob memutuskan untuk lari untuk membakar energi ekstra. Yoghurt menghasilkan  $4,4 \text{ MJ kg}^{-1}$ , dan Bob mampu meningkatkan laju metabolisme menjadi 220W saat berlari. Berapa lama dia harus lari?
4. Jelaskan mengapa suhu turun dengan cepat pada malam hari di daerah gurun!
5. Misalkan seseorang dengan berat 60 kg dan tinggi 1,4 m mengurangi waktu tidur 1 jam/hari dan menghabiskan waktu ini untuk membaca sambil duduk. Jika asupan makanannya tetap tidak berubah, berapa penurunan berat badannya dalam satu tahun?

### **STEM**

Aplikasi termodinamika dalam kehidupan sehari-hari sangat banyak dan setiap saat selalu berkembang. Bumi setiap hari

---

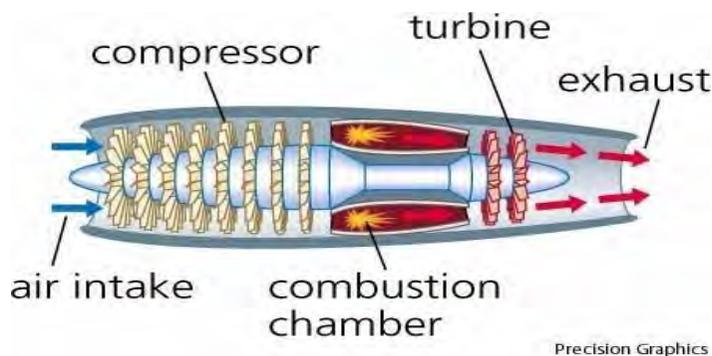
menerima energi gelombang elektromagnetik dari matahari, dan di bumi energi tersebut berubah menjadi energi panas, energi angin, gelombang laut, proses pertumbuhan berbagai tumbuhan dan banyak proses alam lainnya. Proses di dalam diri manusia juga merupakan proses konversi energi yang kompleks, dari energi kimia yang diperoleh dari makanan menjadi energi gerak untuk melakukan aktifitas fisik, termasuk juga berfikir.

Dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, maka prinsip alamiah dalam berbagai proses termodinamika direkayasa menjadi berbagai bentuk mekanisme untuk membantu manusia dalam melaksanakan kegiatannya. Mesin-mesin transportasi darat, laut, maupun udara merupakan contoh yang sangat kita kenal dari mesin konversi energi, yang merubah energi kimia dalam bahan bakar atau sumber energi lain menjadi energi mekanik dalam bentuk gerak bahkan sampai ke luar angkasa. Pabrik-pabrik dapat memproduksi berbagai jenis barang, digerakkan oleh mesin pembangkit energi listrik yang menggunakan prinsip konversi energi panas dan usaha. Untuk kenyamanan hidup, kita memanfaatkan mesin air conditioning, mesin pemanas, dan refrigerator yang menggunakan prinsip dasar termodinamika.

Siklus Brayton dikembangkan oleh seorang engineer asal Amerika bernama George Brayton (1830-1892). Siklus Brayton adalah sebuah siklus termodinamika yang mendeskripsikan kerja dari mesin turbin, gas turbin, atau mesin turbo jet. Siklus Brayton merupakan siklus tenaga yang dapat beroperasi baik secara internal maupun eksternal pada combustion engine. Siklus Brayton menjadi konsep dasar untuk setiap mesin turbin gas. Siklus termodinamika ini dikembangkan pertama kali oleh John Barber pada tahun 1791, dan disempurnakan lebih lanjut oleh

---

George Brayton. Pada awal penerapan siklus ini, Brayton dan ilmuwan lainnya mengembangkan mesin *reciprocating* dikombinasikan dengan kompresor. Mesin tersebut berdampingan dengan mesin Otto diaplikasikan pertama kali ke otomotif roda empat. Namun mesin Brayton kalah pamor dengan mesin Otto empat silinder yang dikembangkan oleh Henry Ford. Pada perkembangan selanjutnya, siklus Brayton lebih diaplikasikan khusus ke mesin-mesin turbojet dan turbin gas.



### Mesin Turbojet Pesawat Terbang

#### 1. Proses Kompresi Isentropik

Udara atmosfer masuk ke dalam sistem turbin gas melalui sisi inlet kompresor. Oleh kompresor, udara dikompresikan sampai tekanan tertentu diikuti dengan volume ruang yang menyempit. Proses ini tidak diikuti dengan perubahan entropi, sehingga disebut proses isentropik. Proses ini ditunjukkan dengan angka 1-2 pada kurva di atas.

#### 2. Proses Pembakaran Isobarik

Pada tahap 2-3, udara terkompresi masuk ke ruang bakar. Bahan bakar diinjeksikan ke dalam ruang bakar, dan diikuti dengan proses pembakaran bahan bakar tersebut. Energi panas hasil pembakaran diserap oleh udara ( $q_{in}$ ),

meningkatkan temperatur udara, dan menambah volume udara. Proses ini tidak mengalami kenaikan tekanan udara, karena udara hasil proses pembakaran bebas berekspansi ke sisi turbin. Karena tekanan yang konstan inilah maka proses ini disebut isobarik.

### 3. Proses Ekspansi Isentropik

Udara bertekanan yang telah menyerap panas hasil pembakaran, berekspansi melewati turbin. Sudut-sudut turbin yang merupakan nozzle-nozzle kecil berfungsi untuk mengkonversikan energi panas udara menjadi energi kinetik. Sebagian energi tersebut dikonversikan turbin untuk memutar kompresor. Pada sistem pembangkit listrik turbin gas, sebagian energi lagi dikonversikan turbin untuk memutar generator listrik. Sedangkan pada mesin turbojet, sebagian energi panas dikonversikan menjadi daya dorong pesawat oleh sebetuk nozzle besar pada ujung keluaran turbin gas.

### 4. Proses Pembuangan Panas

Tahap selanjutnya adalah pembuangan udara kembali ke atmosfer. Pada siklus Brayton ideal, udara yang keluar dari turbin ini masih menyisakan sejumlah energi panas. Panas ini diserap oleh udara bebas, sehingga secara siklus udara tersebut siap untuk kembali masuk ke tahap 1-2 lagi.

### **Efisiensi Siklus Brayton**

Perhitungan energi panas / kalor masuk ( $q_{in}$ ):

$$q_{in} = h_3 - h_2 = cp(T_3 - T_2)$$

Perhitungan energi panas keluar ( $q_{out}$ ):

$$q_{out} = h_4 - h_1 = cp(T_4 - T_1)$$

Perhitungan efisiensi termal ( $\eta_{th}$ ):

$$\eta_{th} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}} \eta_{th} = \frac{q_{in}}{q_{in}} - \frac{q_{out}}{q_{in}} \eta_{th} = 1 - \frac{c_p (T_4 - T_1)}{c_p (T_3 - T_2)}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

Karena proses 1-2 dan 3-4 adalah isentropik, dan jika  $\gamma$  adalah rasio kapasitas kalor, maka:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{(\gamma - 1)}{\gamma}} \quad \text{dan} \quad \frac{T_4}{T_3} = \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{(\gamma - 1)}{\gamma}}$$

Dan seperti diketahui bahwa  $P_2 = P_3$  serta  $P_1 = P_4$ , maka:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3} \rightarrow \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

dimana:

$\eta_t$  = efisiensi termal siklus Brayton

$T_1$  = temperatur udara inlet kompresor (atmosfer)

$T_2$  = temperatur udara outlet kompresor

$P_1$  = tekanan udara inlet kompresor (atmosfer)

$P_2$  = tekanan udara outlet kompresor

$\gamma$  = rasio kapasitas kalor ( $\gamma$  udara pada 20°C adalah 1,67)



## DAFTAR PUSTAKA

1. Mikrajuddin, A. (2016). Fisika Dasar I. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
2. Mikrajuddin, A. (2017). Fisika Dasar II. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
3. Setiono, I. (2015). Akumulator, pemakaian dan perawatannya. METANA, 11(01).
4. Apriyani, N. (2017). Penurunan kadar surfaktan dan sulfat dalam limbah laundry. Media Ilmiah Teknik Lingkungan (MITL), 2(1), 37-44.
5. Bahl, A. (2008). Essentials of physical chemistry. S. Chand Publishing.
6. Myers, D. (2006). Surfactant Science And Technology. New Jersey: Jhon Wiley and Son.
7. Christian, G. D., Dasgupta, P. K., & Schug, K. A. (2013). Analytical chemistry. John Wiley & Sons.
8. Pecsok, R. L., & Shields, L. D. (1968). Modern methods of chemical analysis.
9. Anderson, J. R., & Boudart, M. (2012). Catalysis: science and technology (Vol. 11). Springer Science & Business Media.
10. Averill, B. A., Moulijn, J. A., Van Santen, R. A., & Van Leeuwen, P. W. N. M. (Eds.). (1999).
11. Catalysis: An Integrated Approach. Studies in Surface Science and Catalysis, Volume 123. Elsevier Science & Technology.
12. Ugo, R. (Ed.). (2012). Aspects of homogeneous catalysis: a series of advances (Vol. 5). Springer Science & Business Media.
13. Nørskov, J. K., Studt, F., Abild-Pedersen, F., & Bligaard, T. (2014). Fundamental concepts in heterogeneous catalysis. John Wiley & Sons.
14. Van Santen, R. A. (2017). Modern heterogeneous catalysis: an introduction. John Wiley & Sons.
15. Vannice, M. A., & Joyce, W. H. (2005). Kinetics of catalytic reactions (Vol. 134). New York: Springer.

16. Keren, D. (2003). Protein electrophoresis in clinical diagnosis.
17. Weinberger, R. (2000). Practical capillary electrophoresis. Elsevier.
18. Hammond, P. (Ed.). (2013). Applied electromagnetism. Elsevier.
19. Kelly, P. F. (2014). Electricity and magnetism. CRC Press.
20. Ozerov, R. P., & Vorobyev, A. A. (2007). Physics for chemists. Elsevier.
21. Suwitra, N. (1999). Pengantar Fisika Zat Padat. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, Jakarta, Indonesia.
22. Holmberg, K., & Matthews, A. (2009). Coatings tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering. Elsevier.
23. Sidhu, T. S., Prakash, S., & Agrawal, R. D. (2005). Studies on the properties of high-velocity oxy-fuel thermal spray coatings for higher temperature applications. *Materials Science*, 41(6), 805-823.
24. Kittel, C. (2021). Introduction to solid state physics Eighth edition.
25. Heimann, R. B. (2008). Plasma-spray coating: principles and applications. John Wiley & Sons
26. Morgan J. Introduction to university physics. 2nd ed. vol. 1. Boston, MA: Allyn and Bacon; 1969.
27. Halliday, David, Robert Resnick, Fisika Jilid 1, Jakarta: Erlangga, 1996.
28. Arthur Beiser, Concepts of modern physics, Boston: McGraw-Hill, 2003
29. S. Eamshaw. On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether. *Trans. Camb. Phil. Soc.*, 7:97-112, 1842.
30. C.P. Bean. Magnetization of hard superconductors. *Phys. Rev. Lett.*, 8(6):250-253, 1962.
31. H. Ishigaki, H. Ito, M. Itoh, A. Hida, and R. Takahata. Magnetic coupling by using levitation characteristics of YBCO

- superconductors. IEEE trans. superconductivity, 3(1):404-407, 1993.
32. S. Nagaya, N. Hirano, M. Takenaka, M. Minami, and H. Kawashima. Fundamental study on high-T<sub>c</sub> superconducting magnetic bearings for flywheel system. IEEE trans. superconductivity, 5(2):643-649, 1995.
  33. M. Komori, A. Tsuruta, S. Fukata, and T. Matsushita. Superconducting bearing system using high T<sub>c</sub> superconductors. IEEE trans. superconductivity, 5(2):634-637, 1995.
  34. K.B. Ma, C.K. McMichael, M.A. Lamb, and W.K. Chu. Application of high temperature superconductors on levitation bearings, torque transmissions and vibration dampers. IEEE trans. superconductivity, 3(1):388-391, 1993.
  35. J.R. Hull, E.F. Hilton, T. M. Mulcahy, Z.J. Yang, and A. Lockwood. Low friction in mixed- $\mu$  superconducting bearings. J. Appl. Phys., 78(11):6833-6838, 1995.
  36. P. Schonhuber and F.C. Moon. Levitation forces, stiffness and force-creep in YBCO high-T<sub>c</sub> superconducting thin films. Applied Superconductivity, 2(7/8):523-534, 1994.
  37. J.R. Hull, T.M. Mulcahy, K.L. Uherka, and R.G. Abboud. Low rotational drag in High-temperature superconducting bearing. IEEE trans. superconductivity, 5:626-629, 1995.
  38. C. Navau and A. Sanchez. Stability and losses of levitating superconducting disk and cylinders. IEEE trans, superconductivity, 7(2):920-923, 1997.
  39. M. Zeisberger and W. Gawalek. Losses in magnetic bearings. Mat. Scin. Engineering B, 53:193-197, 1998.
  40. Z. J. Yang and J. R. Hull. Energy loss in superconducting bearing systems. IEEE trans, superconductivity, 7(2):318-321, 1997.
  41. J. R. Hull, J.F. Labataille, T. M. Mulcahy, and J.A. Lockwood. Reduced hysteresis loss in superconducting bearings. Appl. Supercond., 4(1/2):1-10, 1996.

42. T. Sugiura, M. Tashiro, Y. Uematsu, and M. Yoshizawa. Mechanical stability of a high-*t<sub>c</sub>* superconducting levitation system. *IEEE trans. supercondwctivity*, 7(2):386-389, 1997.
43. T. Hikihara, H. Adachi, S. Ohashi, Y. Hirane, and Y. Ueda. Levitation drift of flywheel and HTSC bearing system caused by mechanical resonance. *Physica C*, 291:34-40, 1997.



## *Tim Penulis*



**Dr. Dewi Wulandari, S.Si, M.Si**

NIP 197801202008012014

Lahir di Medan, Tanggal 20 Januari 1978. Riwayat pendidikan lulus dari SDN 064024 Medan 1990, Lulus SMP Negeri 10 Medan 1993, dan Lulus SMAS Al-Azhar Medan tahun 1996. Melanjutkan studi ke Jurusan Fisika FMIPA Universitas Sumatera utara tahun 1996 dan lulus pada tahun 2000. Melanjutkan studi Magister Fisika di Institut Teknologi Bandung dan lulus pada tahun 2005. Melanjutkan studi Doktoral Fisika di Institut Teknologi Bandung dan lulus pada tahun 2018. Tahun 2008 diterima sebagai dosen tetap di Universitas Negeri Medan hingga sekarang aktif sebagai dosen di Jurusan Fisika Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Negeri Medan.



**Dr. Destria Roza, S.Si., M.Si.**

NIP. 197112171997022001

Lahir di Matur Kabupaten Agam, tanggal 17 Desember 1971. Riwayat Pendidikan Lulus SDN 2 Matur tahun 1983, Lulus SMPN 1 Matur tahun 1987 dan SMAN Matur tahun 1990. Melanjutkan studi S1 ke UGM pada jurusan kimia tamat 1996 melanjutkan studi S2 ditempat yang sama tamat tahun 2004. Kemudian melanjutkan S3 di ITB dan lulus pada tahun 2016 Tahun 1997 diterima sebagai dosen di Universitas Negeri Medan dan hingga sekarang masih aktif di bekerja di Prodi Kimia



**Muhammad Aswin Rangkuti, S.Pd., M.Pd.**

NIP 198903052015041001

Lahir di Kisaran, Tanggal 5 Maret 1989. Riwayat Pendidikan lulus dari SD Swasta Diponegoro Kisaran tahun 2000, lulus SMP Negeri 1 Kisaran tahun 2003, dan lulus SMAN 2 Kisaran tahun 2006. Melanjutkan studi ke Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA Universitas Negeri Medan tahun 2006 dan lulus tahun 2010. Melanjutkan studi magister Pendidikan Fisika di Universitas Negeri Medan dan lulus tahun 2013. Tahun 2014 diterima sebagai dosen tetap di Universitas Negeri Medan hingga sekarang aktif sebagai dosen di Jurusan Fisika Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Negeri Medan.



**Yul Ifda Tanjung, S.Pd., M.Pd**

NIP 198507272008122003

Lahir di Medan, Tanggal 27 Juli 1985, riwayat pendidikan lulus SDN 060804 Medan tahun 1997, Lulus dari SMP Negeri 4 Medan tahun 2000, dan Lulus dari SMKN 3 Medan tahun 2003. Melanjutkan studi ke Universitas Negeri Medan Prodi Pendidikan Fisika tahun 2003 dan Lulus 2007. Pada tahun 2012 melanjutkan studi Magister di Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Negeri Medan dan selesai 2014. Tahun 2008 diterima sebagai dosen tetap di Universitas Negeri Medan hingga sekarang aktif sebagai dosen di Jurusan Fisika Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Negeri Medan.



**Irham Ramadhani, S.Pd., M.Pd**

NIP 199003252019031017

Lahir di Pangkalan Berandan, Tanggal 25 Maret 1990. Riwayat pendidikan lulus dari SDN 050743 P. Berandan 2001, Lulus SMP Negeri 2 Babalan 2004, dan Lulus SMAN 1 Babalan tahun 2007. Melanjutkan studi ke Universitas Negeri Medan Prodi Pendidikan Fisika tahun 2007 dan lulus pada tahun 2012. Melanjutkan studi Magister di Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Negeri Medan dan lulus pada tahun 2015. Tahun 2018 diterima sebagai dosen tetap di Universitas Negeri Medan hingga sekarang aktif sebagai dosen di Jurusan Fisika Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Negeri Medan.



**Muhammad Fadlan Raihan**

Lahir di Medan, tanggal 17 Oktober 1996. Riwayat Pendidikan lulus SDN 017973 Kisaran tahun 2008, Lulus MTs PMDU Daar Uluum tahun 2011 dan MAN Kisaran Tahun 2014. Melanjutkan studi S1 ke Universitas Negeri Medan pada jurusan fisika hingga tahun 2018. Kemudian melanjutkan studi S2 di ITB dan lulus pada tahun 2021 dan kemudian melanjutkan studi S3 di ITB pada tahun 2022. Mulai tahun 2021, mengajar sebagai dosen luar biasa untuk mata kuliah fisika dasar untuk prodi teknologi pangan di Universitas Nasional Karangturi.



**Syauqi Abdurrahman Abrori**

Lahir di Madiun pada 5 Oktober 1995. Ia menyelesaikan pendidikan dasar di SD 01 Taman, Madiun pada tahun 2007, SMP 02 Madiun pada tahun 2010, dan SMA 02 Madiun pada tahun 2013. Lulus S1 di Program Studi Teknik Fisika ITB tahun 2018. Lulus S2 di Program Studi Teknik Fisika ITB tahun 2020. Beberapa karya tulis ilmiahnya telah dimuat di jurnal internasional. Saat ini sedang menempuh studi S3 di Program Studi Teknik Fisika ITB dengan fokus penelitian pada Nanomaterial untuk Biosensor.



**Irmaniar**

Lahir di Palembang, tanggal 26 Januari 1994. Riwayat pendidikan lulus SDN 04 petang tahun 2005, lulus SMPN 177 Jakarta tahun 2008 dan SMAN 63 Jakarta tahun 2011. Kemudian melanjutkan program sarjana fisika Fakultas MIPA di Universitas Gadjah Mada dan lulus tahun 2017. Setelahnya melanjutkan studi pascasarjana pada program fisika di Institut Teknologi Bandung dan lulus tahun 2021. Tahun 2022 mengajar sebagai dosen luar biasa pada matakuliah fisika terapan di Politeknik Ahli Usaha Perikanan pada program studi Teknologi Penangkapan Ikan.

Fisika adalah ilmu pengetahuan sains yang mempelajari fenomena alam serta interaksi yang terjadi seperti materi, energi, dan perubahan zat baik yang sifatnya mikroskopis hingga makroskopis. Fisika berasal dari kata 'physics' yang artinya alam sehingga fokus keilmuannya mencakup seluruh hal yang berkaitan dengan alam. Tahapan dalam mempelajari fenomena alam meliputi hipotesis, melakukan eksperimen, analisis hasil eksperimen, dan menarik kesimpulan sehingga untuk mengungkap rahasia alam membutuhkan waktu yang relatif panjang, namun tentunya dengan hasil yang akurat dan dapat dibuktikan. Fisika Dasar yang merupakan mata kuliah wajib bagi mahasiswa jurusan Kimia di tahun pertama perkuliahan. Persepsi mahasiswa Kimia yang mengambil mata kuliah Fisika Dasar bahwa kebanyakan mahasiswa tersebut menganggap bahwa mata kuliah ini hanyalah mata kuliah prasyarat. Padahal sebenarnya banyak sekali konsep Fisika yang langsung dapat diaplikasikan pada ilmu Kimia. Topik-topik Fisika yang akan disusun dalam bahan ajar akan diarahkan langsung pada aplikasi ilmu Kimia sehingga ketika menggunakannya, mahasiswa langsung memahami kegunaan materi Fisika tersebut pada ilmu yang sedang mereka pelajari. Pemahaman konsep dasar fisika secara utuh disertai implementasinya pada bidang kimia akan membuat penguasaan sains terasa lebih bermakna karena mahasiswa memahami aplikasi ilmu yang dipelajari. Usaha ini dilakukan untuk meningkatkan kemampuan literasi sains dengan memadukan disiplin keilmuan fisika dan kimia. Buku didesain dalam delapan bab dengan materi katalis, pemisahan zat, gelombang elektromagnetik infra merah (FTIR) dan sinar X (XRF), rekayasa material melalui pelapisan permukaan bahan (coating), desain baterai aki, sabun dan detergen serta kaitannya dengan fluida, superkonduktor dan termodinamika. Buku ini memiliki nuansa yang cukup berbeda dengan buku yang sudah ada. Cakupan materi fisika terintegrasi dengan ilmu kimia dengan melibatkan pendekatan STEM (Science, Technology, Engineering and Math). Bagi mahasiswa yang menggunakan buku ini, akan menjadi suatu tantangan baru bagi mereka. Mahasiswa tidak hanya harus memahami konsep fisika dengan baik, tetapi juga harus mencerna banyak terminologi konsep tersebut dalam keilmuan kimia dan didukung dengan kemampuan matematika yang baik serta kreatifitas dalam membangun konsep pembelajaran terpadu dalam STEM. Buku interdisipliner seperti ini menjadi sangat menarik sehingga diharapkan literasi sains dan matematika mahasiswa dapat ditingkatkan melalui buku ini.

### *Tim Penulis*

- Dewi Wulandari
- Destria Roza
- Muhammad Aswin Rangkuti
- Yul Ifda Tanjung
- Irham Ramadhani
- Muhammad Fadlan Raihan
- Syaugi Abdurrahman Abrori
- Irmaniar

Untuk akses Buku Digital,  
Scan QR CODE



**Media Sains Indonesia**  
Melong Asih Regency B.40, Cijerah  
Kota Bandung - Jawa Barat  
Email : [penerbit@medsan.co.id](mailto:penerbit@medsan.co.id)  
Website : [www.medsan.co.id](http://www.medsan.co.id)

