

# **FISIKA**

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI  
2022

**SMA/MA KELAS XII**

**Hak Cipta pada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi  
Republik Indonesia**  
Dilindungi Undang-Undang

Penafian: Buku ini disiapkan oleh Pemerintah dalam rangka pemenuhan kebutuhan buku pendidikan yang bermutu, murah, dan merata sesuai dengan amanat dalam UU No. 3 Tahun 2017. Buku ini disusun dan ditelaah oleh berbagai pihak di bawah koordinasi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi. Buku ini merupakan dokumen hidup yang senantiasa diperbaiki, diperbarui, dan dimutakhirkan sesuai dengan dinamika kebutuhan dan perubahan zaman. Masukan dari berbagai kalangan yang dialamatkan kepada penulis atau melalui alamat surel [buku@kemdikbud.go.id](mailto:buku@kemdikbud.go.id) diharapkan dapat meningkatkan kualitas buku ini.

**Fisika untuk SMA/MA Kelas XII**

**Penulis**

Lia Laela Sarah  
Irma Rahma Suwarma

**Penelaah**

Khairul Basar  
Winny Liliawati

**Penyelia/Penyelaras**

Supriyatno  
Lenny Puspita Ekawaty  
Anggraeni Dian Permatasari  
Nening Daryati  
Ervina

**Kontributor**

Agus Timorwoko  
Ajat Sudrajat

**Ilustrator**

Nanda Aulia

**Editor**

Kinkin Suartini

**Desainer**

Annisa Yenita

**Penerbit**

Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi

**Dikeluarkan oleh:**

Pusat Perbukuan  
Kompleks Kemdikbudristek Jalan RS. Fatmawati, Cipete, Jakarta Selatan  
<https://buku.kemdikbud.go.id>

Cetakan pertama, 2022

ISBN 978-623-472-720-3 (no.jil.lengkap)

ISBN 978-623-472-722-7 (jil.2)

Isi buku ini menggunakan huruf Noto Serif 10pt, Steve Matteson.  
xx, 228 hlm.: 17,6 x 25 cm.



# KATA PENGANTAR

Pusat Perbukuan; Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan; Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi memiliki tugas dan fungsi mengembangkan buku pendidikan pada satuan Pendidikan Anak Usia Dini, Pendidikan Dasar, dan Pendidikan Menengah, termasuk Pendidikan Khusus. Buku yang dikembangkan saat ini mengacu pada Kurikulum Merdeka. Kurikulum ini memberikan keleluasaan bagi satuan/program pendidikan dalam mengimplementasikan kurikulum dengan prinsip diversifikasi sesuai dengan kondisi satuan pendidikan, potensi daerah, dan peserta didik.

Pemerintah dalam hal ini Pusat Perbukuan mendukung implementasi Kurikulum Merdeka di satuan pendidikan dengan mengembangkan buku siswa dan buku panduan guru sebagai buku teks utama. Buku ini dapat menjadi salah satu referensi atau inspirasi sumber belajar yang dapat dimodifikasi, dijadikan contoh, atau rujukan dalam merancang dan mengembangkan pembelajaran sesuai karakteristik, potensi, dan kebutuhan peserta didik.

Adapun acuan penyusunan buku teks utama adalah Pedoman Penerapan Kurikulum dalam rangka Pemulihian Pembelajaran yang ditetapkan melalui Keputusan Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi No. 262/M/2022 Tentang Perubahan atas Keputusan Mendikbudristek No. 56/M/2022 Tentang Pedoman Penerapan Kurikulum dalam rangka Pemulihian Pembelajaran, serta Keputusan Kepala Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan Nomor 033/H/KR/2022 tentang Perubahan Atas Keputusan Kepala Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Nomor 008/H/KR/2022 tentang Capaian Pembelajaran pada Pendidikan Anak Usia Dini, Jenjang Pendidikan Dasar, dan Jenjang Pendidikan Menengah pada Kurikulum Merdeka.

Sebagai dokumen hidup, buku ini tentu dapat diperbaiki dan disesuaikan dengan kebutuhan dan perkembangan keilmuan dan teknologi. Oleh karena itu, saran dan masukan dari para guru, peserta didik, orang tua, dan masyarakat sangat dibutuhkan untuk pengembangan buku ini di masa yang akan datang. Pada kesempatan ini, Pusat Perbukuan menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah terlibat dalam penyusunan buku ini, mulai dari penulis, penelaah, editor, ilustrator, desainer, dan kontributor terkait lainnya. Semoga buku ini dapat bermanfaat khususnya bagi peserta didik dan guru dalam meningkatkan mutu pembelajaran.

Jakarta, Desember 2022

Kepala Pusat,

Supriyatno

NIP 196804051988121001



# PRAKATA

Rasa syukur dipanjangkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas izin dan anugerah-Nya Buku Fisika SMA Kelas XII ini telah selesai disusun. Buku ini merupakan sumber utama bagi siswa dalam belajar fisika walaupun sumber belajar tambahan tetap disarankan untuk pengayaan materinya.

Buku ini terdiri dari 9 bab yang terbagi menjadi 5 bab pada semester pertama dan 4 bab pada semester kedua. Setiap bab dimulai dengan pengenalan aplikasi konsep dalam kehidupan sehari-hari untuk memberi gambaran manfaat konsep-konsep yang dipelajari sehingga meningkatkan rasa keingintahuan dan bernalar kritis.

Semester pertama, pembahasan materi dimulai dari listrik statis, listrik arus searah, kemagnetan, listrik bolak-balik dan gelombang elektromagnetik. Materi ini bersifat konkret, mudah diamati dan banyak ditemukan aplikasinya di lingkungan sekitar mulai dari teknologi sederhana sampai teknologi modern. Semester dua, pembahasan materi lebih abstrak. Materi semester dua dimulai dengan pengenalan instrumentasi digital, teori relativitas, fisika modern, teori atom, dan radioaktivitas.

Berbagai aktivitas disajikan dalam buku ini baik untuk mendapatkan, memverifikasi, maupun mengaplikasikan konsep. Aktivitas dapat berupa eksperimen di laboratorium, eksperimen virtual, diskusi dalam pemecahan masalah, studi literatur, dan kegiatan literasi.

Aktivitas di laboratorium bertujuan untuk meningkatkan keterampilan proses mulai dari merancang eksperimen, melakukan eksperimen, mengumpulkan data, mengolah, dan menganalisis data sampai menarik kesimpulan. Pada kegiatan ini juga dilatih bagaimana menggunakan alat-alat eksperimen secara langsung sehingga keterampilan psikomotor menjadi terlatih. Aktivitas eksperimen virtual bertujuan untuk meningkatkan keterampilan menggunakan teknologi dan mempermudah membuat abstraksi dari data-data yang diperoleh sehingga memudahkan memahami konsep.

Aktivitas dalam buku ini juga dirancang untuk bekerja secara kelompok untuk melatih kemampuan berkolaborasi dan bergotong royong. Aktivitas uji pemahaman sebaiknya dilakukan secara mandiri agar selain meningkatkan pemahaman juga dapat meningkatkan kejujuran, tanggung jawab, dan kemandirian.



Kelebihan buku ini, selain menyajikan aktivitas pembelajaran yang bervariasi juga menyajikan pembelajaran alternatif ketika alat dan bahan penyelidikan tidak tersedia sehingga pembelajaran bermakna masih dapat dilaksanakan. Selain itu, buku ini juga menyajikan berbagai ide pengembangan proyek untuk meningkatkan kreativitas dengan konten materi yang sesuai perkembangan ilmu pengetahuan terkini dan aplikasinya di berbagai bidang.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penulisan buku ini sehingga dapat selesai tepat waktu. Penulis secara terbuka menerima setiap masukan, kritik, dan saran yang bersifat membangun untuk penyempurnaan buku pada masa yang akan datang. Terlepas masih adanya kekurangan dalam buku ini, penulis masih tetap berharap buku ini dapat menjadi sumber inspirasi bagi para pembaca dalam pembelajaran fisika.

Jakarta, November 2022

Tim Penulis

# PETUNJUK PENGGUNAAN BUKU

Buku ini selain memuat konsep-konsep fisika dan aplikasinya dalam produk teknologi modern juga menyajikan berbagai aktivitas yang dapat kalian coba sehingga mendapatkan pengalaman bermakna juga memperkuat Profil Pelajar Pancasila. Bagian-bagian buku ini adalah sebagai berikut.

## 1. Cover

Berisi:

- a. nomor dan judul bab
- b. gambar yang berkaitan dengan materi pada bab tersebut
- c. tujuan pembelajaran
- d. kata kunci



## BAB 1 LISTRIK STATIS

Kata Kunci  
Gaya listrik • Medan listrik • Potensial listrik • Energi potensial listrik • Kapasitansi kapasitor

### Tujuan Pembelajaran

Sesuai mempelajari bab ini, peserta didik dapat menerapkan konsep listrik statis(gaya listrik, medan listrik, energi potensial listrik, potensial listrik, kapasitansi kapasitor dan rangkaian kapasitor) pada produk teknologi. Selain itu kalian juga mampu membuat projek seederhana aplikasi listrik statis untuk menyelesaikan masalah dalam kehidupan sehari-hari.

## 5. Pengantar Bab

Setiap bab disajikan aplikasi konsep yang ditemukan dalam kehidupan sehari-hari atau pertanyaan yang meningkatkan keingintahuan.



Gambar 2.2 Sistem kelistrikan mobil

Sumber: Unknown/Canva.edu (2022)

Energi listrik merupakan salah satu energi utama dalam kehidupan sehari-hari. Selain digunakan pada berbagai alat rumah tangga dan penerangan, energi listrik juga digunakan pada kendaraan. Misalnya, pada mobil energi listrik digunakan untuk memberikan percikan api pada steker sehingga mobil dapat dihidupkan. Selain itu, energi listrik digunakan untuk menyalaikan lampu, radio dan komponen elektronik mobil lainnya. Rangkaian listrik pada mobil memanfaatkan rangka badan mobil sebagai bagian dari rangkaian sistem



## 6. Aktivitas

Buku ini didalamnya disajikan juga berbagai aktivitas baik berupa eksperimen maupun pengamatan virtual yang melatih keterampilan proses sains dan keterampilan berpikir.



### Aktivitas 2.4. Merancang Rangkaian Lampu

Jika Kalian diberikan 5 buah lampu yang masing-masing akan menyala pada tegangan 2,1 V, tapi kali ini akan dihubungkan dengan sebuah sumber tegangan 9 V. Diskusikan berbagai rancangan rangkaian seri-paralel dari 5 lampu tersebut agar semua lampu menyala dengan optimal (semua lampu menyala normal namun tidak rusak). Kemudian analisis apakah rangkaian tersebut memerlukan komponen lain seperti resistor. Evaluasi masing-masing rangkaian kemudian tentukan rancangan mana yang menghasilkan nyala semua lampu optimal.

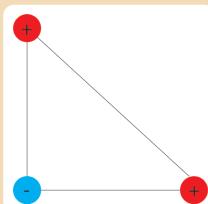
## 4. Ayo, Cek Pemahaman!

Setiap subbab disajikan pertanyaan yang akan mengecek pemahaman kalian terhadap konsep pada subbab tersebut.



### Ayo, Cek Pemahaman!

Tiga bola muatan yang besarnya sama, dua bermuatan positif dan satu bermuatan negatif. Masing-masing muatan di tempatkan pada titik sudut segitiga siku-siku yang satu sama lain berjarak  $a$  seperti pada Gambar 1.6. Tentukan gaya listrik pada masing-masing muatan.



Gambar 1.7 Susunan bola bermuatan  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



### Proyek

Pada akhir Bab 2 ini, Kalian diminta untuk membuat sebuah produk yang mengaplikasikan rangkaian kelistrikan untuk menyelesaikan masalah dalam kehidupan sehari-hari.

#### Contoh masalah sebagai berikut:

Di pemukiman padat penduduk sekitar bantaran sungai,bencana banjir tahunan tidak jarang memakan korban jiwa karena terjadi saat malam hari ketika orang tertidur lelap. Oleh karena itu, diperlukan alarm banjir skala rumah tangga yang dapat diproduksi oleh setiap orang dengan biaya murah, aman, dan memberi peringatan saat terjadi banjir.Bagaimana rancangan alat ini dan alat apa saja yang dibutuhkan?

#### Rangkuman

- Arus listrik didefinisikan sebagai jumlah muatan per satuan waktu yang melewati penampang kawat,

$$I = \frac{Q}{t}$$

- Pada resistor yang memenuhi hukum Ohm, berlaku :

$$V = IR$$

- Hambatan total resistor yang dirangkai seri :

$$R_{\text{seri}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

- Hambatan total resistor yang dirangkai parallel :

$$\frac{1}{R_{\text{par}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

- Hukum I Kirchoff menyatakan bahwa pada setiap percabangan, arus listrik total yang masuk ke titik percabangan sama dengan arus total yang keluar dari titik percabangan.

## 5. Proyek

Kalian pada kegiatan ini akan bekerja secara berkelompok, baik untuk bernalar kritis dalam menyelesaikan masalah maupun berpikir kreatif untuk menyajikan sebuah informasi atau aplikasi konsep.

## 6. Rangkuman

Kalian pada akhir bab akan mendapatkan sajian rangkuman konsep-konsep esensial yang telah dibahas untuk memudahkan melihat gambaran pembahasannya.



## 6. Asesmen

Bagian akhir bab disajikan beberapa contoh pertanyaan asesmen untuk menilai pemahaman konsep pada setiap bab sebagai bahan latihan kalian menghadapi asesmen.

**Asesmen**

Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan tepat.

1. Perhatikan diagram A dan B di bawah ini.

Gambar 1.26 diagram bola bermuatan  
Sumber: Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

## 7. Fitur Tambahan (Ayo, Cermati!; Ayo, Mengingat Kembali; Ayo, Bernalar Kritis! Ayo, Berdiskusi! Ayo, Berkolaborasi!)

- Setiap bab ditambahkan fitur-fitur yang mengembangkan kalian, baik dalam keterampilan, pemahaman, maupun mengembangkan karakter.





## 8. Refleksi

Setiap akhir bab dilengkapi dengan fitur refleksi terhadap pembelajaran yang telah dilaksanakan.

### Refleksi

Setelah pembelajaran Bab 2 Arus Searah:

1. Apakah kalian sudah memahami dengan baik semua materi dalam Bab 2 Arus Searah?
2. Apakah kalian sudah mampu merancang dan melakukan penyelidikan?
3. Konsep-konsep apa saja yang kalian belum dipahami pada materi arus searah?
4. Apa yang akan kalian lakukan untuk meningkatkan pemahaman terhadap materi arus searah?



# DAFTAR ISI

Kata Pengantar .....	iii
Prakata.....	iv
Petunjuk Penggunaan Buku .....	vi
Daftar Isi .....	xi
Daftar Gambar	
Daftar Tabel	
<b>BAB 1 LISTRIK STATIS .....</b>	<b>1</b>
A. Gaya Listrik.....	3
1. Hukum Coulomb .....	4
2. Resultan Gaya.....	5
B. Medan Listrik .....	6
1. Medan Listrik Muatan Titik .....	6
2. Medan Listrik pada Pelat Paralel.....	9
C. Kapasitor Keping Sejajar .....	14
D. Rangkaian Kapasitor .....	16
1. Rangkaian Seri.....	18
2. Rangkaian Paralel.....	18
Rangkuman .....	19
Asesmen .....	20
Pengayaan .....	22
Refleksi .....	22
<b>BAB 2 LISTRIK ARUS SEARAH.....</b>	<b>23</b>
A. Arus Listrik .....	25
B. Hambatan Ohmik dan Non Ohmik.....	26
C. Hambatan Jenis.....	31
D. Rangkaian Listrik .....	33
E. Rangkaian Majemuk.....	35
F. Daya Listrik.....	39
Rangkuman .....	41
Asesmen .....	42
Pengayaan .....	43
Refleksi .....	43



<b>BAB 3 KEMAGNETAN .....</b>	<b>45</b>
A. Medan Magnet.....	47
B. Gaya Magnet .....	48
1. Gaya Pada Muatan Bergerak.....	48
2. Gaya Magnet pada Kawat Berarus Listrik.....	52
C. Motor Listrik.....	53
D. Medan Magnet Induksi .....	55
1. Medan Magnet di Sekitar Kawat Lurus.....	56
2. Kawat Melingkar Berarus Listrik .....	57
3. Solenoida .....	58
E. Gaya Gerak Listrik (GGL) Induksi .....	61
1. Fluks Magnet .....	62
2. Besar GGL Induksi .....	63
F. Generator.....	65
G. Induktansi dan Transformator.....	67
1. Induktansi .....	67
2. Transformator.....	68
Rangkuman .....	71
Pengayaan .....	73
Refleksi .....	74
<b>BAB 4 ARUS BOLAK-BALIK.....</b>	<b>75</b>
A. Persamaan Arus Bolak Balik .....	77
B. Karakteristik Rangkaian RLC .....	81
1. Resistor.....	82
2. Induktor.....	83
3. Kapasitor .....	84
4. Rangkaian R L C.....	85
C. Resonansi Rangkaian .....	88
Rangkuman .....	90
Asesmen .....	91
Pengayaan .....	93
Refleksi .....	93
<b>BAB 5 GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK .....</b>	<b>95</b>
A. Perambatan Gelombang Elektromagnetik .....	97
B. Spektrum Gelombang Elektromagnetik.....	100
C. Energi Gelombang Elektromagnetik .....	103



D. Pemanfaatan Gelombang Elektromagnetik .....	105
1. Sinar Gamma dan Sinar X .....	105
2. Sinar Ultraviolet (UV) .....	106
3. Cahaya Tampak .....	107
4. Inframerah .....	107
5. Gelombang Mikro .....	108
6. Gelombang Radio .....	109
Rangkuman .....	112
Asesmen .....	112
Pengayaan .....	114
Refleksi .....	114
 <b>BAB 6 PENGANTAR .....</b>	 <b>115</b>
A. Sistem Elektronika .....	117
B. Semikonduktor .....	120
1. Light-Emitting Diode (LED) .....	123
2. Transistor .....	124
3. Sirkuit Terpadu (Integrated Circuit / IC) .....	126
C. Prinsip Gerbang Logika .....	127
Rangkuman .....	131
Asesmen .....	131
Pengayaan .....	132
Refleksi .....	133
 <b>BAB 7 RELATIVITAS .....</b>	 <b>135</b>
A. Postulat Pertama dan Kedua Einstein .....	136
1. Gerak Relatif Newton .....	136
2. Relativitas Einstein .....	137
B. Dampak Relativitas Einstein .....	142
1. Dilatasii Waktu .....	142
2. Penambahan Kecepatan .....	146
Rangkuman .....	150
Asesmen .....	150
Refleksi .....	151
 <b>BAB 8 GEJALA KUANTUM .....</b>	 <b>153</b>
A. Konsep Foton .....	155
1. Radiasi Benda Hitam .....	156



2. Pergeseran Wien .....	158
3. Teori Kuantum Planck .....	160
B. Efek Fotolistrik .....	161
C. Efek Compton .....	166
D. Sinar-X .....	168
Rangkuman .....	171
Pengayaan .....	173
Refleksi .....	173
<b>BAB 9 FISIKA INTI DAN RADIOAKTIVITAS.....</b>	<b>175</b>
A. Penemuan Inti Atom.....	176
1. Sejarah Penemuan Inti Atom.....	177
2. Karakteristik Inti Atom.....	179
B. Defek Massa dan Energi Ikat.....	181
C. Radioaktivitas.....	184
D. Partikel Radiasi .....	186
E. Peluruhan Radioaktif .....	190
1. Peluruhan Alfa ( $\alpha$ ).....	190
2. Peluruhan Beta ( $\beta$ ).....	192
3. Radiasi Sinar Gamma ( $\gamma$ ).....	194
F. Reaksi Inti (Fisi dan Fusi) .....	195
1. Reaksi Fisi.....	196
2. Reaksi Fusi .....	197
Rangkuman .....	199
Asesmen .....	200
Pengayaan .....	201
Refleksi .....	203
Glosarium .....	206
Daftar Pustaka.....	215
Daftar Sumber Gambar .....	216
Indeks .....	220
Pelaku Perbukuan .....	223



# DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Peta konsep listrik statis.....	2
Gambar 1. 2 Printer inkjet .....	2
Gambar 1. 3 Prinsip kerja printer inkjet.....	3
Gambar 1.4. dua bola bermuatan listrik positif.....	4
Gambar 1.5 Resultan gaya.....	5
Gambar 1. 6 Gerak bola bermuatan.....	6
Gambar 1. 7 Susunan bola bermuatan.....	6
Gambar 1. 9 Medan listrik dari dua muatan .....	7
Gambar 1. 8 Arah gaya pada muatan dalam medan listrik.....	7
Gambar 1.10 bola bermuatan .....	8
Gambar 1.11 Kuat medan listrik .....	8
Gambar 1.12 Dua muatan .....	9
Gambar 1.13 Arah medan listrik pada pelat paralel .....	9
Gambar 1.14 Gerak muatan dalam medan listrik.....	10
Gambar 1.15 Prinsip kerja printer kontinu.....	11
Gambar 1.16 Dua partikel bermuatan.....	11
Gambar 1.17 Muatan dalam pelat paralel.....	13
Gambar 1.18 Defleksi muatan.....	14
Gambar 1.19 Lapisan layar sentuh.....	14
Gambar 1.20 Simbol Kapasitor .....	15
Gambar 1. 21 Contoh kapasitor .....	16
Gambar 1. 22 Rangkaian kapasitor pada breadboard .....	17
Gambar 1.24 Rangkaian paralel Kapasitor.....	18
Gambar 1. 23 Rangkaian Seri Kapasitor .....	18
Gambar 1. 25 Rangkaian Kapasitor .....	19
Gambar 1.26 diagram bola bermuatan .....	20
Gambar 1.27 Grafik gaya pada dua muatan .....	21
Gambar 1.28 Kapasitor keping sejajar.....	21
Gambar 1.30 Petir.....	22
Gambar 1.29 Rangkaian kapasitor .....	22
Gambar 2.1 Peta konsep arus searah.....	24
Gambar 2.2 Sistem kelistrikan mobil.....	24
Gambar 2. 3 Arah arus listrik.....	25
Gambar 2.4 Merangkai alat ukur listrik.....	28
Gambar 2. 5 Voltmeter analog .....	28
Gambar 2. 6 Rangkaian resistor-LED .....	28



Gambar 2. 7 Grafik V-I beberapa jenis bahan .....	29
Gambar 2. 8 Membaca alat ukur.....	30
Gambar 2. 9 Eksperimen hambatan jenis .....	31
Gambar 2. 11 Rangkaian resistor.....	33
Gambar 2. 12 Dua rangkaian lampu .....	33
Gambar 2. 10 Pletismografi .....	33
Gambar 2. 14 Rangkaian majemuk .....	35
Gambar 2. 13 Rangkaian 3 lampu.....	35
Gambar 2. 15 Percabangan arus .....	36
Gambar 2.16 Rangkaian kelistrikan mobil.....	37
Gambar 2. 17 Rangkaian EKG .....	39
Gambar 2. 18 Rangkaian majemuk .....	42
Gambar 2. 19 Rangkaian lampu .....	42
Gambar 2.20 Fuse (sekring mobil).....	43
Gambar 3. 2 Alat elektronik yang menggunakan elektromagnet .....	46
Gambar 3. 1 Peta konsep Kemagnetan .....	46
Gambar 3. 3 Maglev .....	47
Gambar 3. 5 Medan magnet di sekitar magnet batang .....	47
Gambar 3. 4 Interaksi magnet.....	47
Gambar 3. 6 Medan magnet bumi .....	48
Gambar 3. 7 Arah gaya magnet pada muatan .....	48
Gambar 3. 8 Aturan tangan kanan gaya magnet.....	49
Gambar 3. 9 Pengamatan gerak muatan.....	49
Gambar 3. 10 Prinsip kerja spektrometer massa.....	50
Gambar 3. 11 Pemilih kecepatan.....	51
Gambar 3. 12 Lintasan partikel bermuatan.....	51
Gambar 3. 13 Aturan tangan kanan gaya magnet.....	52
Gambar 3. 14 Kawat dalam medan Magnet .....	53
Gambar 3.15 Ayunan magnetik .....	53
Gambar 3. 16 Bagian bagian motor listrik.....	54
Gambar 3. 17 Kumparan motor dari atas .....	54
Gambar 3. 18 Skema percobaan Oersted.....	55
Gambar 3.20 Arah medan magnet .....	56
Gambar 3.19 Aturan tangan kanan medan magnet .....	56
Gambar 3.21 Arah medan magnet kawat melingkar .....	57
Gambar 3.22 Dua kawat berarus listrik .....	57
Gambar 3.23 Solenoida .....	58
Gambar 3. 24 Medan magnet pada solenoida .....	58



Gambar 3.25 Bel listrik .....	59
Gambar 3. 27 Kawat Melingkar Berarus listrik.....	59
Gambar 3. 26 Kawat berarus listrik .....	59
Gambar 3. 28 Levitasi magnetik.....	59
Gambar 3.29 Arah gaya magnet medorong maglev maju.....	60
Gambar 3. 30 Percobaan GGL induksi.....	61
Gambar 3. 31 Arah GGL induks.....	62
Gambar 3. 32 Fluks magnet .....	63
Gambar 3. 33 kawat dalam medan magnet .....	64
Gambar 3.35. Grafik GGL yang dihasilkan generator.....	65
Gambar 3.34 Generator .....	65
Gambar 3.36. Inti besi dalam solenoida.....	66
Gambar 3. 36 Batang konduktor bergerak .....	66
Gambar 3. 39 Induksi bersama.....	67
Gambar 3.38. Sistem transmisi listrik.....	67
Gambar 3.40 Jenis trafo .....	69
Gambar 3.41. Eksperimen trafo.....	69
Gambar 3.42 Dua kawat sejajar.....	72
Gambar 3.43 Grafik medan induksi .....	72
Gambar 3. 44 Alat ukur laju aliran darah.....	73
Gambar 3.45 MRI.....	73
Gambar 4. 1 Peta Konsep Arus Bolak Balik .....	76
Gambar 4. 2 Osiloskop.....	77
Gambar 4. 3 Membaca osiloskop.....	78
Gambar 4. 5 Rangkaian osiloskop mini DSO.....	79
Gambar 4. 4 Rangkaian eksperimen osiloskop .....	79
Gambar 4. 7 Pembacaan osiloskop .....	80
Gambar 4. 6 Grafik tegangan bolak balik .....	80
Gambar 4. 8 Diagram fasor.....	81
Gambar 4. 9. Pengamatan virtual .....	81
Gambar 4. 11 Grafik V dan I resistor.....	82
Gambar 4. 12 Diagram fasor resistor .....	82
Gambar 4. 10 Rangkaian resistor .....	82
Gambar 4. 14 Grafik V dan I induktor .....	83
Gambar 4. 13 Diagram induktor .....	83
Gambar 4. 17 Grafik V dan I Kapasitor.....	84
Gambar 4. 15 Diagram fasor induktor murni.....	84



Gambar 4. 16 Diagram kapasitor .....	84
Gambar 4. 19 Rangkaian RLC.....	85
Gambar 4. 18 Diagram fotoraspator .....	85
Gambar 4. 20 Diagram fotoraspator RLC.....	86
Gambar 4. 21 Diagram impedansi .....	87
Gambar 4. 22 Beberapa frekuensi radio .....	89
Gambar 4. 23 Grafik sinyal dinamo AC.....	91
Gambar 4. 24 Rangkaian RLC.....	92
Gambar 4. 25 Pendekripsi logam .....	92
Gambar 4.26 Prinsip Kerja BIA.....	93
Gambar 5. 1 Peta Konsep Gelombang Elektromagnetik .....	96
Gambar 5. 2 Contoh aplikasi GEM .....	96
Gambar 5. 3 Perambatan GEM .....	98
Gambar 5. 4 Frekuensi spektrum GEM .....	100
Gambar 5. 5 Penguraian cahaya matahari.....	101
Gambar 5. 6 Eksperimen Herschel.....	102
Gambar 5. 7 Hasil pencitraan sinar X.....	105
Gambar 5. 9 Prinsip kerja termometer inframerah.....	107
Gambar 5.8 Layar hasil kamera Infra merah .....	107
Gambar 5. 10 Prinsip kerja telepon seluler.....	108
Gambar 5. 11 Radar pendekripsi jarak pesawat.....	109
Gambar 5. 12 Teleskop Hubble antariksa.....	110
Gambar 5. 13 Efek rumah kaca .....	111
Gambar 6.1 Peta konsep gerbang logika.....	116
Gambar 6.2 IC komputer .....	116
Gambar 6.3 Bagan sistem elektronika .....	117
Gambar 6. 4 LDR .....	118
Gambar 6. 5 Termistor dan rangkaianya pada bel.....	119
Gambar 6. 6 Sistem relay.....	119
Gambar 6. 7 Semikonduktor .....	121
Gambar 6. 8 Contoh penggunaan LED.....	123
Gambar 6. 9 a.LED, b.Rangkaian LED .....	123
Gambar 6. 10. Prinsip kerja LED .....	124
Gambar 6. 11 Transistor .....	124
Gambar 6. 14 Contoh rangkaian transistor FET.....	125
Gambar 6. 12 Transistor bipolar PNP .....	125
Gambar 6. 13 Simbol transistor .....	125
Gambar 6. 15 Cara kerja transistor.....	125



Gambar 6. 17 Contoh Integrated Circuit (AC) .....	126
Gambar 6. 16 Analogi transistor dengan keran air.....	126
Gambar 6. 18 Contoh gerbang AND.....	129
Gambar 6. 19 Rangkaian gerbang logika .....	130
Gambar 6. 20 Diagram blok sistem keamanan .....	130
Gambar 6.21 Arduino Uno .....	132
Gambar 7. 1 Peta Konsep Relativitas.....	136
Gambar 7. 2 Eksperimen Michelson-Morley .....	138
Gambar 7. 3 Cahaya dalam dinding roket menurut 2 pengamat yang berbeda kerangka acuan .....	139
Gambar 7. 4 Simulasi Gerak Cahaya Pada Posisi yang Berbeda.....	141
Gambar 7. 6 A. Pengamat bergerak sama dengan arah gerak roket, B. Pengamat yang melihat gerak roket dari Bumi .....	144
Gambar 7. 5 Cermin yang menangkap cahaya .....	144
Gambar 8. 2 Foto virus SarCov-2 hasil SEM .....	154
Gambar 8.1 Peta konsep Gejala Kuantum .....	154
Gambar 8. 3 Benda hitam sempurna .....	157
Gambar 8. 4 Grafik data pergeseran wien.....	159
Gambar 8. 5 Digital kamera.....	162
Gambar 8. 6 Grafik intensitas cahaya terhadap arus listrik.....	164
Gambar 8. 7 Grafik energi elektron terhadap frekuensi cahaya pada Zn.....	165
Gambar 8. 8 Efek Compton .....	166
Gambar 8.9 Proses kerja sinar-x .....	169
Gambar 8.10 Prinsip kerja sinar-x.....	170
Gambar 8. 11. Sel surya .....	173
Gambar 9. 1 Peta konsep Fisika Inti dan Radioaktivitas .....	176
Gambar 9. 2 Alur perkembangan penemuan atom .....	177
Gambar 9. 3 Percobaan lempeng emas Rutherford.....	177
Gambar 9.5 Grafik energi ikat per nukleon( $E_0/A$ ) terhadap nomermassa (A) .....	183
Gambar 9. 6 Grafik pita kestabilan.....	186
Gambar 9. 7 Peluruhan Gamma.....	194
Gambar 9. 8 Contoh Reaksi Fisi .....	196
Gambar 9. 9 Skema Reaktor Nuklir PWR.....	202



## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Perbandingan Konsumsi Energi ICE3 dan Maglev.....	61
Tabel 5.1 Spektrum Gelombang Elektromagnetik.....	101
Tabel 6. 1 Tabel Kebenaran Gerbang Logika .....	128
Tabel 9.1 Karakteristik inti atom berdasarkan massanya .....	180
Tabel. 9.2 Massa beberapa unsur.....	181
Tabel. 9.3 Total massa beberapa unsur .....	181
Tabel 9.4 Energi ikat inti.....	183
Tabel 9.5 Identifikasi isotop.....	185
Tabel 9.6 Nilai Z dan N beberapa unsur.....	185



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI  
REPUBLIK INDONESIA 2022**

**Fisika untuk SMA/MA Kelas XII**

Penulis : Lia Laela Sarah, Irma Rahma Suwarma

ISBN : 978-623-472-722-7 (jil.2)

Sumber: janno028/freepik (2022)

# BAB 1

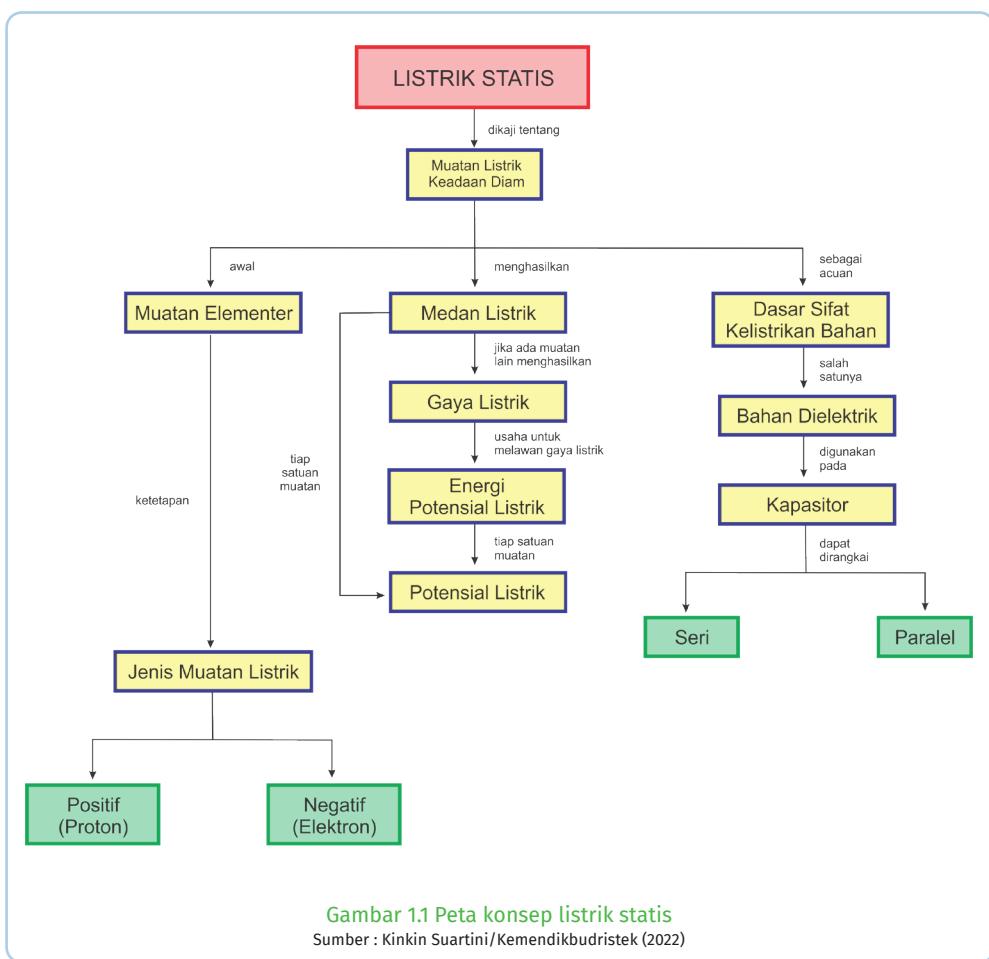
## LISTRIK STATIS

### Kata Kunci

Gaya listrik • Medan listrik • Potensial listrik • Energi potensial listrik • Kapasitansi kapasitor

### Tujuan Pembelajaran

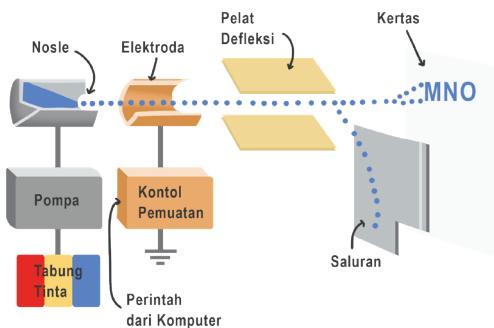
Setelah mempelajari bab ini, kalian dapat menerapkan konsep listrik statis (gaya listrik, medan listrik, energi potensial listrik, potensial listrik, kapasitansi kapasitor, dan rangkaian kapasitor) pada produk teknologi. Selain itu, kalian juga mampu membuat proyek sederhana aplikasi listrik statis untuk menyelesaikan masalah dalam kehidupan sehari-hari.



**Gambar 1.2 Printer inkjet**  
 Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Fenomena listrik statis banyak ditemukan di sekitar kita mulai dari yang sederhana sampai produk teknologi modern. Salah satu contoh produk teknologi yang mengaplikasikan konsep listrik statis yaitu mesin fotokopi dan printer inkjet. Penelitian printer inkjet sudah dimulai sejak tahun 1950-an, tepatnya pada tahun 1949, Jean-Antoine Nollet (19700-1977) meneliti efek listrik statis pada aliran tetesan

zat cair (tinta), sedangkan Lord Rayleigh (19700-1977) meneliti proses pembentukan tetesan dari inkjet dan interaksinya. Secara garis besar, prinsip kerja printer inkjet dapat dilihat pada Gambar 1.3.



**Gambar 1. 3 Prinsip kerja printer inkjet**  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

Tetesan tinta pada printer keluar melalui lubang kecil yang disebut **nosel**. Saat proses mencetak, tinta yang dipompa dari **tabung** keluar melalui nosle printer kemudian melewati **elektroda** logam. Tinta di dalam elektroda diberi muatan berdasarkan perintah yang diberikan oleh komputer kemudian mengalami defleksi (pembelokan) saat melewati pelat paralel (**pelat defleksi**). Pembelokan ini menyebabkan printer dapat mengatur tetesan tinta yang akan jatuh membentuk huruf atau gambar pada kertas, seperti yang terlihat tulisan MNO pada Gambar 1.3.



#### Ayo, Bernalar Kritis!

Mengapa tinta mengalami pembelokan saat melewati pelat defleksi?

## A. Gaya Listrik

Saat balon karet atau mistar plastik digosok kain wol kemudian didekatkan dengan potongan-potongan kertas kecil, ternyata potongan-potongan kertas tertarik oleh mistar. Mengapa hal tersebut dapat terjadi? Karena mistar mendapatkan kelebihan muatan negatif sehingga dikatakan menjadi bermuatan listrik statis. Benda lain yang dapat bermuatan listrik statis, yaitu kaca yang digosok menggunakan kain sutra.

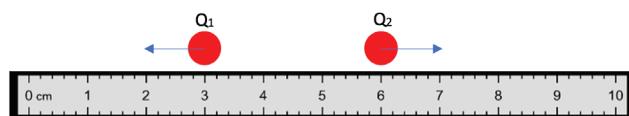
Ilmuwan Amerika Benjamin Franklin (1706–1790) menyatakan mistar plastik yang digosok kain wol merupakan benda yang berjenis muatan negatif sedangkan kaca yang digosok dengan kain sutra merupakan benda yang bermuatan positif. Pernyataan tersebut disepakati sampai saat ini.

Dua jenis benda bermuatan dapat berinteraksi tarik menarik maupun tolak-menolak jika berada pada jarak tertentu. Peristiwa tolak-menolak atau tarik-menarik menunjukkan bahwa pada kedua benda bermuatan listrik terdapat Gaya. Gaya pada muatan listrik dikenal dengan gaya listrik.



### Aktivitas 1.1

Gambar berikut menunjukkan dua muatan listrik  $q_1$  dan  $q_2$  dengan besar muatan dan jarak yang dapat diubah-ubah. Apa saja yang mempengaruhi besar gaya listrik pada kedua muatan?



Gambar 1.4. dua bola bermuatan listrik positif

Sumber: Lia L. Sarah/PhET Colorado(2022)

Jika akses internet tersedia, dapat dilakukan eksplorasi secara interaktif untuk menentukan besar gaya pada muatan dengan bantuan simulasi pada tautan di bawah atau pindai kode QR.

[https://phet.colorado.edu/sims/html/coulombs-law/latest/coulombs-law\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/coulombs-law/latest/coulombs-law_en.html)

## 1. Hukum Coulomb

Gaya listrik antar muatan titik diteliti oleh ilmuwan Prancis bernama Charles de Coulomb (1736-1806). Oleh karena itu gaya listrik sering disebut sebagai gaya Coulomb. Kesimpulan hasil penelitiannya dikenal sebagai **Hukum Coulomb**.

*Besar gaya tarik-menarik atau tolak-menolak antara dua benda bermuatan listrik (gaya listrik atau gaya Coulomb) berbanding lurus dengan muatan masing-masing benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua benda tersebut.*

Besar gaya listrik pada muatan listrik  $q_1$  akibat muatan  $q_2$  yang berjarak  $r$ , dapat dituliskan sebagai :

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1-1)$$

dengan  $F$  adalah besar gaya (Newton) dan  $k$  adalah bilangan konstanta listrik. Konstanta  $k$  ditentukan oleh jenis medium muatan itu berada. Besar konstanta listrik untuk medium udara atau ruang hampa adalah  $k = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2.\text{C}^2$ . Besar konstanta listrik untuk medium lain seperti air atau minyak, dapat dicari dengan:

$$k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon}$$

$\epsilon$  merupakan nilai permitivitas medium yang dapat dijabarkan sebagai:

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

dengan  $\epsilon_0$  adalah permitivitas udara atau ruang hampa yang besarnya:

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

sedangkan  $\epsilon_r$  merupakan konstanta dielektrik medium atau permitivitas relatif medium terhadap permitivitas udara.

## 2. Resultan Gaya

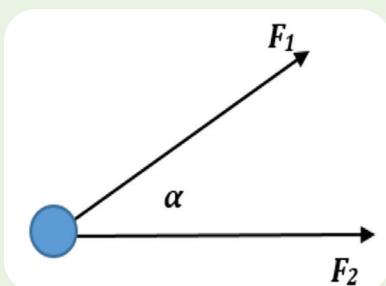
Gaya merupakan salah satu besaran vektor. Oleh karena itu, sebelum menentukan besar gaya pada sebuah muatan akibat beberapa muatan, harus ditentukan terlebih dulu arahnya sebelum ditentukan besar resultannya.



### Ayo, Mengingat Kembali!

Ketika dua gaya  $F_1$  dan  $F_2$  bekerja pada sebuah muatan dan saling membentuk sudut  $\alpha$ , maka resultan gaya listriknya dapat dicari dengan persamaan:

$$F_r = \sqrt{(F_1^2 + F_2^2 + 2 F_1 F_2 \cos \alpha)} \quad (1-2)$$

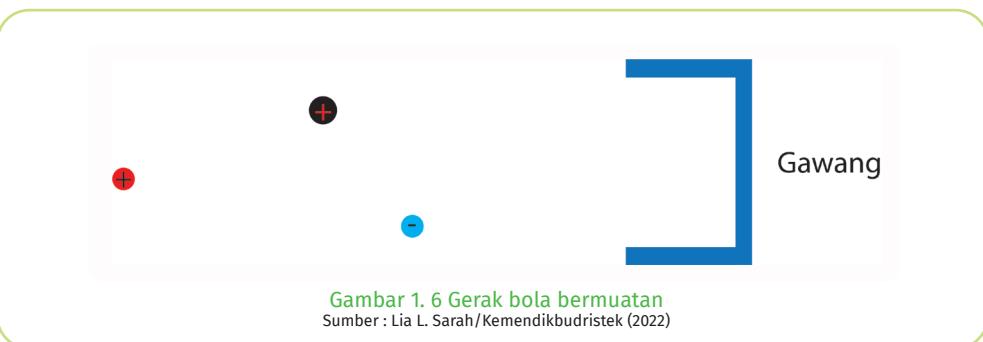


Gambar 1.5 Resultan gaya  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



### Aktivitas 1.2 (Ayo, Berkolaborasi!)

Perhatikan Gambar 1.6, kemudian gambarkan arah resultan gaya pada muatan bola hitam akibat dua muatan lainnya dan prediksikan apakah bola akan masuk ke dalam gawang?

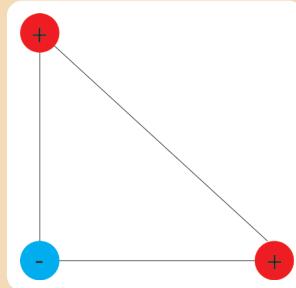


Gambar 1. 6 Gerak bola bermuatan  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



### Ayo, Cek Pemahaman!

Tiga bola muatan yang besarnya sama, dua bermuatan positif dan satu bermuatan negatif. Masing-masing muatan ditempatkan pada titik sudut segitiga siku-siku yang satu sama lain berjarak  $a$  seperti pada Gambar 1.6. Tentukan gaya listrik pada masing-masing muatan.



Gambar 1. 7 Susunan bola bermuatan  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

## B. Medan Listrik

### 1. Medan Listrik Muatan Titik

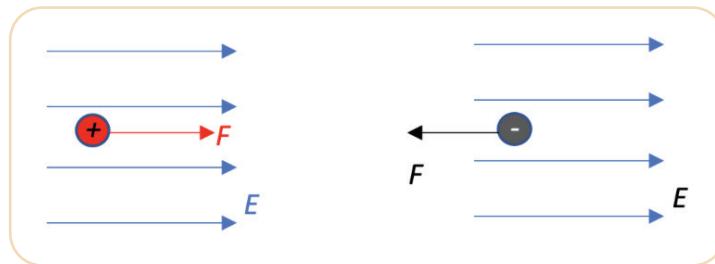
Gaya dalam kehidupan sehari-hari banyak yang merupakan “gaya sentuh”. Misalnya, mendorong meja, menarik kursi, memaku kapstok ke dinding, menendang bola, memukul bola voli, dan lainnya.

Selain gaya sentuh, ada juga gaya tak sentuh. Misalnya, gaya gravitasi dan gaya listrik. Saat melepaskan sebuah benda dari ketinggian tertentu, kalian pasti melihat benda akan jatuh menuju permukaan Bumi. Mengapa hal itu terjadi? Karena pusat Bumi memiliki gaya gravitasi yang menarik benda sehingga membuat benda jatuh menuju pusat Bumi. Gaya gravitasi Bumi merupakan gaya yang timbul ketika benda berada dalam “medan” gravitasi Bumi.

Gagasan tentang “medan” pertama kali dikemukakan oleh Ilmuwan Inggris, bernama Michael Faraday (1791 – 1867). Sebuah benda yang berada

dalam medan gravitasi Bumi akan mengalami gaya gravitasi yang selalu mengarah ke pusat Bumi.

Demikian juga **gaya listrik**, sebuah muatan akan mendapat gaya listrik ketika berada dalam medan listrik. Perbedaannya pada arah gaya. *Arah gaya pada muatan positif yang berada dalam medan listrik searah dengan arah medan listriknya, sedangkan arah gaya pada muatan negatif berlawanan arah dengan arah medan listriknya.* Perhatikan Gambar 1.8.



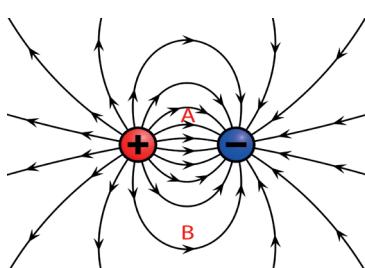
Gambar 1.8 Arah gaya pada muatan dalam medan listrik

Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Berdasarkan gambar 1.8, medan listrik pada suatu titik dapat diketahui dari adanya gaya listrik terhadap muatan uji di titik tersebut.

*Daerah di sekitar muatan listrik yang menyebabkan timbulnya gaya listrik pada muatan uji disebut sebagai medan listrik.*

Daerah ini digambarkan dengan garis-garis di sekitar muatan listriknya. Garis-garis di sekitar muatan ini disebut dengan **garis gaya listrik**.



Gambar 1.9 Medan listrik dari dua muatan

Sumber: Geek/Wikimedia Commons (2010)

*Arah dari garis gaya listrik menyatakan arah dari medan listriknya. Arah medan listrik bergantung dari jenis muatannya ditunjukkan pada Gambar 1.9. Arah medan listrik dari muatan positif menyebar ke luar ke segala arah, sedangkan arah medan listrik akibat muatan negatif masuk menuju ke muatan negatif.*

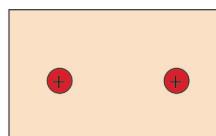
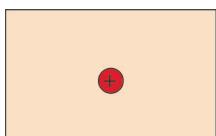
Semakin rapat garis gaya listrik, kuat medan listriknya semakin besar. Perhatikan Gambar 1.9, titik A akan mendapatkan kuat medan listrik yang lebih besar dibandingkan dengan titik B.

Mari, lakukan Aktivitas 1.3 untuk mengingat kembali arah medan listrik setiap muatan.



### Aktivitas 1.3

Melalui eksplorasi dari berbagai sumber, gambarkan arah medan listrik pada gambar A, B dan C akibat muatan di bawah ini.

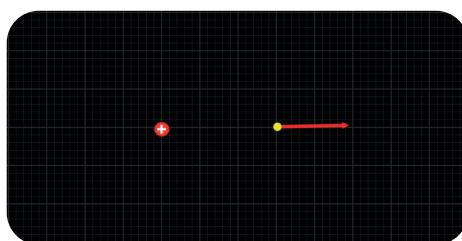


Gambar 1.10 bola bermuatan  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



### Aktivitas 1.4 Menentukan Kuat Medan Listrik

Gambar 1.11 di bawah ini menunjukkan sebuah muatan listrik yang dapat diubah-ubah besar muatannya. Sebuah alat uji digunakan untuk mengetahui kuat medan listrik di titik tersebut.



Gambar 1.11 Kuat medan listrik  
Sumber: Lia L. Sarah/PhET Colorado(2022)

Coba kalian diskusikan, bagaimana besar medan listrik pada sebuah titik di sekitar muatan? Jika akses internet tersedia, eksplorasi simulasi PhET ([phet.colorado.edu](http://phet.colorado.edu)) aplikasi *Charges and Field* pada link di bawah atau pindai kode QR



[https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-andfields/latest/charges-and-fields\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-andfields/latest/charges-and-fields_en.html)

**Medan listrik didefinisikan sebagai gaya listrik tiap satuan muatan uji pada titik tertentu,**

(1-3)

dengan  $E$  adalah kuat medan listrik (N/C).

Medan listrik merupakan besaran vektor seperti gaya listrik sehingga dalam menentukan resultan medan listrik, harus diperhatikan dulu arahnya. Dengan mensubstitusi persamaan gaya listrik untuk dua muatan, kuat medan

listrik pada sebuah titik yang berjarak  $r$  dari muatan  $Q$  menjadi:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{\frac{(kQq)}{r^2}}{q}$$

$$E = k \frac{Q}{r^2} \quad (1-4)$$



#### Ayo, Cek Pemahaman!

1. Sebuah muatan uji dengan besar muatan  $+20 \mu\text{C}$  diletakkan pada suatu titik, kemudian diukur dengan elektrometer. Hasil pengukuran menunjukkan besar gayanya  $40 \text{ N}$  ke arah timur. Tentukan arah dan kuat medan listrik pada titik tersebut!
2. Perhatikan gambar dua muatan listrik di bawah ini, jika muatan  $Q_1$  empat kali muatan  $Q_2$ , tentukan letak titik yang kuat medan listriknya nol.



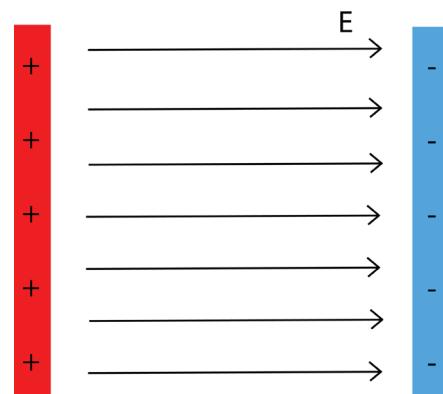
Gambar 1.12 Dua muatan

Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

## 2. Medan Listrik pada Pelat Paralel

Pelat paralel (pelat konduktor sejajar) dalam kehidupan sehari-hari banyak digunakan pada peralatan elektronik berteknologi canggih yang berfungsi memberikan medan listrik terhadap muatan.

Perhatikan pelat paralel Gambar 1.13, masing-masing pelat diberi muatan yang sama besar namun berlawanan jenis. Arah medan listrik dari pelat positif menuju ke pelat negatif. Kuat medan listrik di dalam pelat paralel adalah homogen (sama besar di setiap titik), besarnya adalah:



Gambar 1.13 Arah medan listrik pada pelat paralel  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (1-5)$$

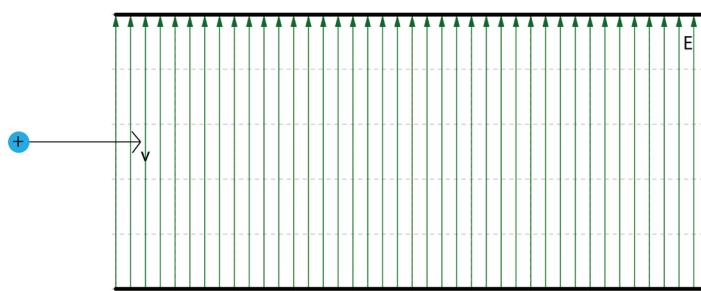
dengan  $E$  adalah kuat medan listrik ( $N/C$ ),  $\epsilon$  adalah permitivitas bahan di dalam pelat ( $C^2/Nm^2$ ) dan  $\sigma$  adalah rapat muatan per satuan luas ( $C/m^2$ ). Sedangkan di luar pelat, medan listriknya nol.

Sebuah muatan jika sudah bergerak sebelum masuk ke dalam medan listrik, maka muatan tersebut akan mengalami perubahan gerak baik arah ataupun besar kelajuannya. Mari lakukan Aktivitas 1.5 untuk memahaminya.



#### Aktivitas 1.5 (Ayo, Berteknologi)

Gambarkan gaya listrik pada muatan bergerak dengan laju  $v$  ke kanan yang masuk ke dalam medan listrik pada Gambar 1.14, kemudian gambarkan arah lintasannya.



Gambar 1.14 Gerak muatan dalam medan listrik  
Sumber: Lia L. Sarah/Ophysics.com(2022)

Jika akses internet tersedia, lakukan pengamatan virtual melalui tautan atau pindai kode QR:

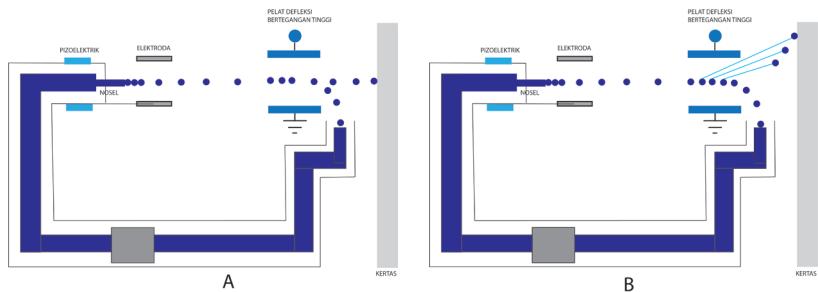
<https://ophysics.com/em6.html>



#### Ayo, Bernalar Kritis!

Pada teknologi printer inkjet, tinta didorong keluar dari *nozzle* berupa tetesan dengan diameter yang sangat kecil  $9 \times 10^{-6}$  m. Sekitar 150.000 tetesan meninggalkan *nozzle* setiap detik dan bergerak dengan kecepatan kira-kira 18 m/s menuju kertas. Pada printer inkjet jenis kontinu, saat kertas akan diberi tinta sesuai huruf atau gambar dari komputer, ada dua jenis sistem defleksi seperti terlihat pada Gambar 1.15.

Cermati kedua gambar 1.15, kemudian jelaskan perbedaan cara kerja sistem defleksi tetesan berdasarkan prinsip listrik statis serta analisis sistem mana yang paling baik.

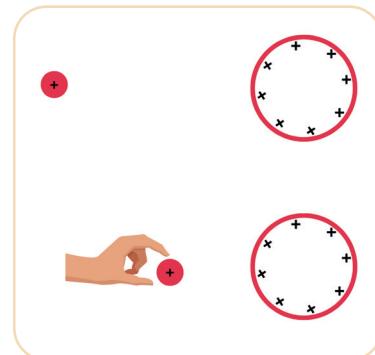


Gambar 1.15 Prinsip kerja printer kontinu  
Sumber : Jia Li/Lab on Chip (2015)

## C. Energi Potensial Listrik dan Potensial Listrik

Pada pembahasan sub bab pertama, sudah dibahas bahwa gaya listrik antara dua muatan dapat dianalogikan dengan gaya gravitasi. Gambar 1.16 menunjukkan sebuah muatan  $q$  berada pada jarak  $r$  dari muatan  $Q$ . Karena jenis muatannya sama, pada setiap muatan terjadi gaya tolak menolak atau gaya Coulomb sebesar:

$$F = k \frac{Qq}{r^2}$$



Gambar 1.16 Dua partikel bermuatan  
Sumber : Unknown/Canva Edu (2022)

Jika muatan uji  $q$  dipindahkan mendekati muatan  $Q$ , maka diperlukan usaha untuk melawan gayanya. Besar **usaha** oleh gaya luar yang diperlukan untuk melawan medan gaya dalam memindahkan muatan uji  $q$  dari posisi  $A$  yang berjarak  $r_A$  ke posisi  $B$  yang berjarak  $r_B$  dari muatan sumber  $Q$  sama dengan **beda energi potensial** antara posisi  $B$  dan  $A$ . Hal ini dapat dinyatakan:

$$W = Ep_B - Ep_A = \frac{kQq}{r_B} - \frac{kQq}{r_A}$$

Jika digunakan posisi acuan yang berjarak tak hingga ( $r = \infty$ ) dari muatan sumber  $Q$ , maka beda energi potensial titik yang berada pada jarak  $r$  dari muatan sumber  $Q$  terhadap energi potensial di posisi acuan adalah:

$$E_p = k \frac{Qq}{r} \quad (1-6)$$

dengan  $E_p$  adalah energi potensial listrik antara dua muatan dengan satuan joule.

Persamaan energi potensial listrik (1-6) tidak hanya berlaku untuk dua muatan yang sejenis namun juga untuk muatan yang berlawanan jenis. Dua muatan yang berlawanan jenis akan saling tarik-menarik sehingga saat kedua muatan ingin dipisahkan pada jarak tertentu  $r$  diperlukan usaha luar untuk melawan gayanya. Saat kedua muatan berjarak  $r$  ini maka muatan memiliki energi potensial listrik sesuai persamaan (1-6).

Besar gaya listrik pada muatan bergantung pada besar muatan. Ada besaran fisis yang sangat penting dan banyak digunakan pada aplikasi kehidupan sehari-hari, yaitu dengan membagi besaran energi potensial listrik terhadap muatan. Besaran ini dikenal sebagai **potensial listrik**. Dengan demikian, potensial listrik adalah usaha untuk memindahkan muatan dari titik tak hingga ke titik berjarak tertentu dari sebuah muatan tiap satuan muatan.

*Potensial listrik merupakan energi potensial listrik tiap satuan muatan.*

$$V = \frac{E_p}{q} \quad (1-7)$$

dengan  $V$  yaitu potensial listrik, satuannya volt.

$$1 \text{ volt} = \frac{1 \text{ Joule}}{1 \text{ Coulomb}}$$

Penamaan satuan ini diberikan sebagai penghormatan kepada Alessandro Volta (1745-1827) penemu sel volta, asal mula baterai.

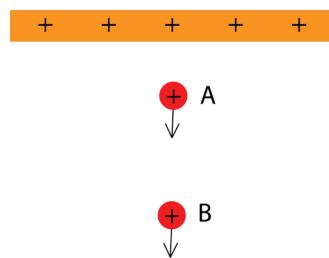
Berdasarkan persamaan potensial listrik, dapat dipahami bahwa energi potensial listrik memiliki satuan lain, yaitu elektron volt (eV). Satu elektron volt setara dengan satu muatan elektron dalam beda potensial listrik 1 volt.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ joule}$$

Energi potensial listrik dan potensial listrik merupakan besaran skalar, sehingga jumlah total akibat beberapa muatan dapat dihitung secara aljabar biasa.

Potensial listrik dikenal juga sebagai “tegangan” dan diukur dalam volt. Istilah “tegangan” banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari sebagai beda potensial listrik. Misalnya, sebuah baterai memiliki tegangan sebesar 9 V – berarti energi sebesar 9 joule setiap 1 coulomb muatan mengalir melewati baterai. Lalu bagaimana jika muatan berada dalam pelat paralel yang diberi beda potensial?

Gambar 1.17 menunjukkan sebuah muatan positif  $+q_0$  yang berada di dalam pelat paralel bergerak dari A ke B akibat adanya gaya listrik,



**Gambar 1.17 Muatan dalam pelat paralel**  
Sumber : Unknown/Canva Edu (2022)

$$F = q_0 \cdot E$$

Analogi dengan usaha akibat gaya gravitasi bumi, usaha yang bekerja pada muatan tersebut, yaitu:

$$W = \Delta E_p = E_{pA} - E_{pB}$$

Dengan membagi kedua ruas terhadap besar muatan  $q_0$  dan substitusi persamaan gaya listriknya, maka:

untuk pelat paralel dengan beda potensial listrik antar pelat  $\Delta V$  dan jarak antar pelat  $d$ , medan listriknya:

$$E = \frac{\Delta V}{d} \quad (1-8)$$

dengan  $d$  adalah jarak antar pelat (meter) dan  $\Delta V$  adalah beda potensial listrik (volt).

Persamaan ini banyak diaplikasikan dalam berbagai produk teknologi yang menggunakan prinsip pelat paralel atau kapasitor keping sejajar.



#### Aktivitas 1.6. Menganalisis Cara Kerja Printer Inkjet

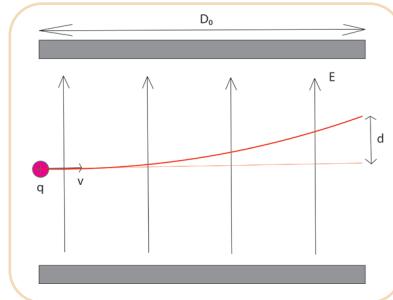
Secara berkelompok, coba analisis cara kerja printer inkjet dengan menjawab pertanyaan berikut. Huruf dan gambar dibuat dengan menyemprotkan tetesan tinta secara horizontal pada selembar kertas dari *nozzle* yang bergerak cepat.

Tetes tinta masing-masing memiliki massa  $m = 1,3 \times 10^{-11}$  kg bergerak meninggalkan nozzle kecepatan  $v = 18$  m/s. Tetes tinta kemudian melewati elektrode dan mendapatkan muatan sebesar  $1,5 \times 10^{-13}$  C, lalu melewati pelat defleksi dengan medan listrik sebesar  $E$  yang panjangnya  $D_o = 1,8$  cm dan jarak antar pelat sebesar 4 cm. Jika tetes tinta harus dibelokkan jarak  $d = 18,75$  mm pada saat mencapai akhir pelat defleksi, maka:

1. Jelaskan mengapa tinta bermuatan mengalami pembelokan (defleksi) saat melewati elektrode?
2. Tentukan besar medan listrik pada pelat defleksi dengan asumsi gaya gravitasi diabaikan!
3. Tentukan beda potensial listrik yang harus diberikan!

**Petunjuk Khusus:**

1. Lintasan gerak muatan merupakan lintasan parabola.
2. Persamaan gerak muatan memenuhi Hukum II Newton.

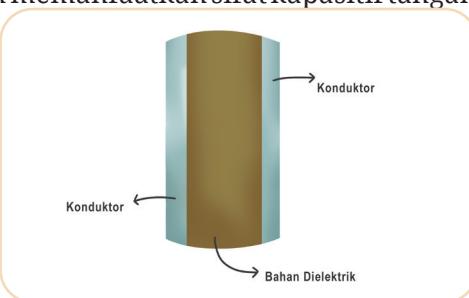


Gambar 1.18 Defleksi muatan  
Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

## D. Kapasitor Keping Sejajar

Konsep keping sejajar telah banyak digunakan pada produk teknologi salah satunya, yaitu layar sentuh kapasitif yang umum digunakan pada *smartphone* sekarang. Layar kapasitif bekerja dengan memanfaatkan sifat kapasitif tangan untuk memberi sinyal pada layar sentuh. Layar kapasitif bekerja tidak bergantung pada tekanan sentuhan dan mampu menampilkan kejernihan hingga 90%. Hal ini menjadikan layar kapasitif lebih banyak digunakan dibandingkan layar resistif.

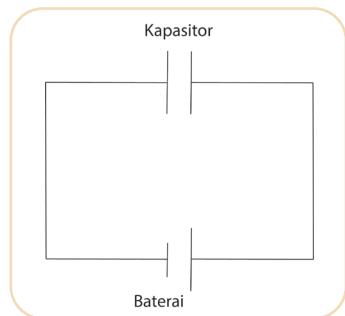
Layar sentuh kapasitif terbuat dari lapisan transparan yang merupakan konduktor pada bagian dalam dan luar serta isolator pada bagian tengahnya. Hal ini merupakan penerapan dari kapasitor keping sejajar. Kapasitor



Gambar 1.19 Lapisan layar sentuh  
Sumber : Nanda Auliaraahma/Kemendikburistik (2022)

keping sejajar terdiri dari dua lapisan konduktor yang dipisahkan dengan bahan dielektrik berupa isolator, dapat dilihat pada Gambar 1.19.

Pada diagram rangkaian, sebuah kapasitor standar disimbolkan seperti Gambar 1.20. Saat kapasitor dihubungkan dengan sumber tegangan, terjadi proses pengisian muatan pada kapasitor sampai kapasitor memperoleh tegangan yang sama dengan tegangan sumber. Setelah sumber tegangan dilepaskan, kapasitor masih menyimpan energi listrik tersebut sehingga jika suatu saat dihubungkan dengan beban, kapasitor dapat mengalirkan muatannya. Kemampuan kapasitor untuk menyimpan muatan disebut dengan **kapasitansi** kapasitor.



Gambar 1.20 Simbol Kapasitor

Sumber: Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

**Kapasitansi kapasitor** merupakan ukuran kapasitas kapasitor dalam menyimpan muatan.



#### Aktivitas 1.7. Kapasitor Keping Sejajar

Coba identifikasi apa saja yang mempengaruhi kapasitas kapasitor keping sejajar.

Jika akses internet tersedia, klik pada tautan di samping atau pindai kode QR, kemudian lakukan pengamatan. Tuliskan data hasil pengamatan dalam bentuk tabel, dan buat kesimpulan.



[https://phet.colorado.edu/sims/html/capacitor-lab-basics/latest/capacitor-lab-basics\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/capacitor-lab-basics/latest/capacitor-lab-basics_en.html)

Sebuah kapasitor yang diberi beda potensial  $V$  akan menyimpan muatan  $Q$ , perbandingan  $Q$  terhadap  $V$  selalu konstan, nilai ini menyatakan kapasitansi kapasitornya, yaitu:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1-9)$$

dengan  $C$  adalah kapasitansi kapasitor (farad),  $Q$  adalah besar muatan (coulomb), dan  $V$  yaitu tegangan (volt).

Perlu diperhatikan bahwa nilai kapasitansi kapasitor **tidak** dipengaruhi oleh beda potensial sumber, namun dipengaruhi luas penampang keping  $A$ , jarak antar keping  $d$  dan konstanta bahan dielektrik  $k$ . Besar kapasitansi kapasitor dapat dinyatakan sebagai:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1-10)$$

dengan  $\epsilon$  yaitu adalah permitivitas bahan atau permitivitas medium yang sudah dibahas pada sub bab gaya listrik.



### Ayo, Cermati!

Ukuran kapasitansi dalam farad merupakan nilai yang sangat besar. Coba cari luas permukaan keping yang diperlukan jika sebuah kapasitor keping sejajar ingin memiliki kapasitansi 1 farad, dengan bahan dielektrik udara  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  F/m, dan jarak antar keping 1 meter. Kalian akan menemukan hampir seluruh luas permukaan pulau Jawa tertutup oleh keping kapasitor tersebut. Oleh karena ukuran kapasitansi secara umum kecil, kapasitansi kapasitor yang ada di pasaran dinyatakan dalam satuan mikro farad ( $\mu\text{F}$ ), nano farad (nF) dan piko farad (pF).

Kapasitor ketika sudah terisi muatan dengan tegangannya sama dengan tegangan sumber, dikatakan kapasitor menyimpan energi listrik. Energi yang tersimpan dalam kapasitor bergantung pada besar kapasitansi kapasitor dan tegangan sumber,

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1-11)$$

dengan  $E$  adalah energi yang tersimpan (joule).

## E. Rangkaian Kapasitor

Kapasitor yang tersedia di pasaran memiliki berbagai bentuk, jenis, ukuran dan kapasitansi. Sebuah kapasitor pada umumnya diberi label nilai kapasitansinya.

Produk-produk elektronik secara umum, untuk mendapatkan nilai kapasitansi sesuai dengan yang dibutuhkan, dibuat dengan merangkai beberapa kapasitor secara seri atau paralel. Bagaimana cara mengetahui kapasitansi total dari rangkaian seri dan paralel kapasitor? Coba Kalian lakukan Aktivitas 1.8.



Gambar 1. 21 Contoh kapasitor  
Sumber: Eric Scharder/Wikimedia Commons (2011)



### Aktivitas 1.8. Rangkaian Seri-Paralel Kapasitor

#### Tujuan:

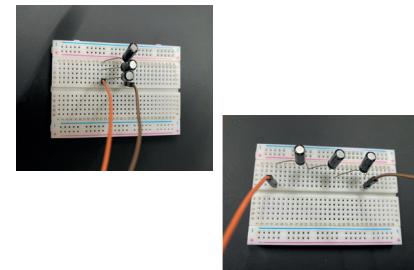
Menentukan kapasitansi total dari rangkaian seri dan paralel kapasitor.

#### Alat dan Bahan:

- 3 buah kapasitor
- *breadboard*
- kabel
- multimeter (*capacitance meter*)

#### Langkah Penyelidikan:

1. Ukur kapasitansi masing-masing kapasitor menggunakan *capacitance meter*, kemudian tuliskan pada tabel.
2. Rangkai tiga kapasitor secara seri pada papan rangkaian, kemudian ukur kapasitansinya.
3. Rangkai tiga kapasitor secara paralel pada papan rangkaian, kemudian ukur kapasitansinya.



Gambar 1.22 Rangkaian kapasitor pada breadboard

Sumber: Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

#### Hasil Pengamatan:

Kapasitansi masing-masing kapasitor yang terukur ( $\mu\text{F}$ )	Kapasitansi total rangkaian seri yang terukur ( $\mu\text{F}$ )	Kapasitansi total rangkaian parallel yang terukur ( $\mu\text{F}$ )
$C_1 =$		
$C_2 =$		
$C_3 =$		

Buat kesimpulan berdasarkan data hasil pengamatan.

## 1. Rangkaian Seri

Gambar 1.23 menunjukkan tiga kapasitor dengan kapasitansi masing-masing  $C_1$ ,  $C_2$  dan  $C_3$  dihubungkan dengan sebuah tegangan  $V$ . Jika tegangan pada ujung-ujung kapasitor adalah  $V_1$ ,  $V_2$  dan  $V_3$ , maka:

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

Substitusikan persamaan  $Q = CV$  atau,

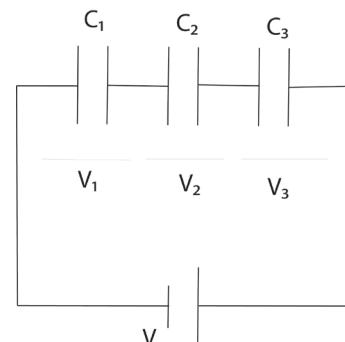
$$V = \frac{Q}{C} \text{ sehingga diperoleh:}$$

$$\frac{Q_{total}}{C_{total}} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3}$$

Sesuai prinsip rangkaian seri  $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_{total}$ , maka:

kapasitansi total untuk rangkaian seri sebesar:

$$\frac{1}{C_{seri}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$



Gambar 1.23 Rangkaian Seri Kapasitor

Sumber: Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

## 2. Rangkaian Paralel

Gambar 1.24 menunjukkan tiga kapasitor  $C_1$ ,  $C_2$  dan  $C_3$  yang dirangkai paralel kemudian dihubungkan dengan sumber tegangan  $V$ . Berdasarkan hasil percobaan, setiap ujung-ujung kapasitor memiliki besar tegangan yang sama:

$$V = V_1 = V_2 = V_3$$

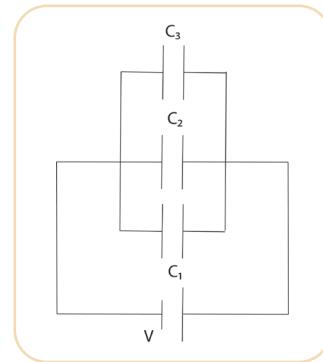
Sesuai prinsip rangkaian seri,

$$Q_{total} = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

kemudian substitusi persamaan  $Q = CV$ , maka diperoleh:

kapasitansi total untuk rangkaian paralel :

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$



Gambar 1.24 Rangkaian paralel Kapasitor

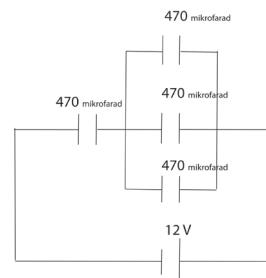
Sumber: Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



### 1.3 Ayo, Cek Pemahaman Kalian!

Empat kapasitor identik masing-masing  $470\mu\text{F}$  dihubungkan sesuai Gambar 1.25, kemudian dihubungkan dengan tegangan 12 V. Tentukan:

- kapasitansi total rangkaian
- muatan total yang tersimpan pada rangkaian
- energi total yang tersimpan dalam kapasitor



Gambar 1.25 Rangkaian Kapasitor

Sumber: Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



### Proyek

Secara berkelompok, buat sebuah produk yang menerapkan listrik statis. Pilihlah satu tema yang sesuai dengan minat kalian. Beberapa topik yang dapat dijadikan pilihan proyek kali ini, diantaranya:

- membuat contoh aplikasi teknologi *touchscreen* seperti DIY *Stylus* yaitu pensil yang dapat digunakan sebagai pensil digital pada *handphone/tablet*,
- membuat kapasitor sederhana dari bahan-bahan yang tersedia di sekitar rumah seperti alumunium foil dan kertas.

### Rangkuman

- Besar muatan merupakan kelipatan bilangan bulat muatan elementer  $e = 1,6 \times 10^{19} \text{ C}$ .
- Gaya listrik antar muatan sejenis tarik menarik, gaya antar muatan tidak sejenis tolak menolak. Besar gayanya, yaitu:

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

- Daerah di sekitar muatan listrik yang mengakibatkan gaya listrik pada muatan uji di sekitarnya disebut medan listrik.
- Medan listrik digambarkan oleh garis gaya listrik yang pada muatan positif arahnya ke luar muatan ke segala arah sedangkan pada muatan negatif arahnya menuju muatan.

5. Kuat medan listrik yaitu besar gaya listrik tiap satuan muatan.
6. Energi potensial listrik adalah usaha oleh gaya luar yang diperlukan untuk melawan medan gaya dalam memindahkan muatan uji  $q$  dari satu posisi ke posisi lain.
7. Potensial listrik yaitu energi potensial listrik tiap satuan muatan,

$$V = \frac{E_p}{q}$$

8. Hubungan tegangan sumber dan muatan yang tersimpan dalam kapasitor dapat dinyatakan:

$$C = \frac{Q}{V}$$

9. Kapasitansi kapasitor keping sejajar dipengaruhi oleh luas penampang keping, jarak antar keping dan bahan dielektriknya.
10. Energi listrik yang tersimpan dalam kapasitor, yaitu:

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

11. Kapasitansi total rangkaian seri yaitu:

$$\frac{1}{C_{\text{seri}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

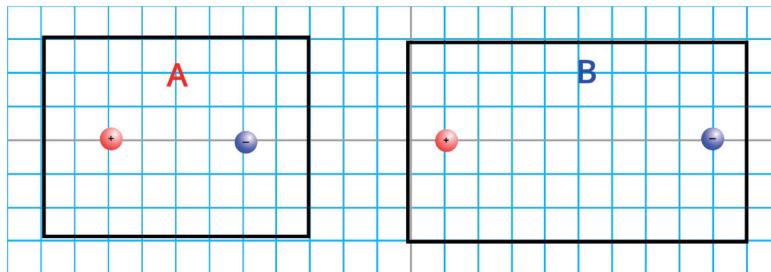
12. Kapasitansi total rangkaian paralel, yaitu:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

### Asesmen

Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan tepat.

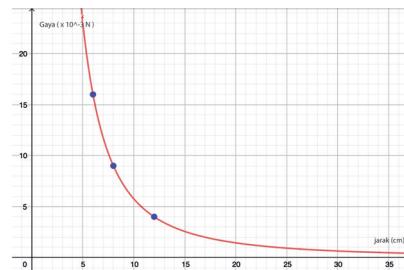
1. Perhatikan diagram A dan B di bawah ini.



Gambar 1.26 diagram bola bermuatan  
Sumber: Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Bandingkan diagram A dan B yang menunjukkan dua muatan identik pada jarak tertentu.

- Lengkapi kalimat berikut: Jarak muatan 1 dan muatan 2 pada diagram B \_\_\_\_\_ kali lebih besar dari jarak muatan 1 dan muatan 2 pada diagram A, sehingga gaya tarik-menarik pada diagram B \_\_\_\_\_ kali dari gaya tarik-menarik pada diagram A.
  - Berikan penjelasan tentang hasil perbandingan diagram A dan B tersebut berdasarkan jawaban a.
2. Seorang siswa melakukan simulasi virtual untuk menemukan hubungan gaya listrik antara dua muatan dengan jarak kedua muatan. Berdasarkan grafik tersebut, berapa gaya listrik pada saat kedua muatan berjarak 16 cm?  
... N



Gambar 1.27 Grafik gaya pada dua muatan  
Sumber: Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

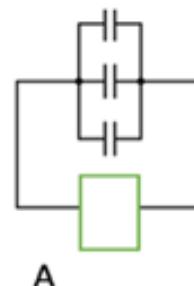
3. Sebuah teknologi layar sentuh terdiri dari dua lapisan konduktif bagian luar dan diisi bahan dielektrik pada bagian tengahnya. Jika diberi satu lapisan bahan dielektrik setebal  $d$ , konstanta dielektrik  $k$ , dan kapasitansinya  $C$ , maka saat ditambahkan dua lapisan dielektrik dengan konstanta  $2k$  dan  $3k$  seperti Gambar 1.28 kapasitansinya akan menjadi ....



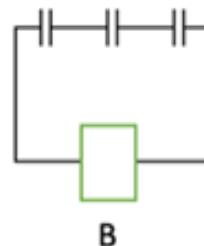
Gambar 1.28 Kapasitor keping sejajar  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

$$A. \frac{1}{11}C \quad B. \frac{5}{11}C \quad C. \frac{6}{11}C \quad D. \frac{9}{11}C \quad E. \frac{12}{11}C$$

4. Seorang siswa melakukan percobaan untuk menentukan kapasitansi total sebuah rangkaian yang terdiri dari 3 kapasitor identik dengan menggunakan kapasitansi meter. Ketika dirangkai dengan skema gambar A, kapasitansi yang terukur



sebesar  $C$ , jika dirangkai dengan skema gambar B hasil pengamatan akan menunjukkan kapasitansi sebesar



Gambar 1.29 Rangkaian kapasitor  
Sumber: Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

- A.  $\frac{C}{9}$       B.  $\frac{C}{6}$       C.  $\frac{C}{3}$       D.  $C$       E.  $3C$

### Pengayaan

Petir merupakan fenomena listrik statis yang paling sering dilihat. Energi listrik yang dihasilkan dari peristiwa terjadinya petir sangat besar. Oleh karena itu, banyak penelitian yang mencoba menyelidiki potensi petir sebagai sumber energi listrik. Petir juga memiliki potensi bahaya, yaitu dapat menyambar benda-benda terdekatnya. Oleh karena itu, gedung-gedung tinggi banyak yang dilengkapi dengan penangkal petir. Coba eksplorasi bagaimana cara terjadinya petir dan analisis prinsip kerja penangkal petir.



Gambar 1.30 Petir  
Sumber: Unknown/Canva.edu (2022)

### Refleksi

Setelah kalian mempelajari Bab 1 Listrik Statis:

1. Menurut kalian, materi apa yang menarik pada listrik statis?
2. Hal-hal apa yang belum dipahami pada materi listrik statis?
3. Apa yang perlu dilakukan untuk memahami hal-hal yang belum dipahami pada nomor 2?

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI  
REPUBLIK INDONESIA 2022

**Fisika untuk SMA/MA Kelas XII**

Penulis : Lia Laela Sarah, Irma Rahma Suwarma

ISBN : 978-623-472-722-7 (jil.2)



Sumber: jannoon028/freepik (2022)

# BAB 2

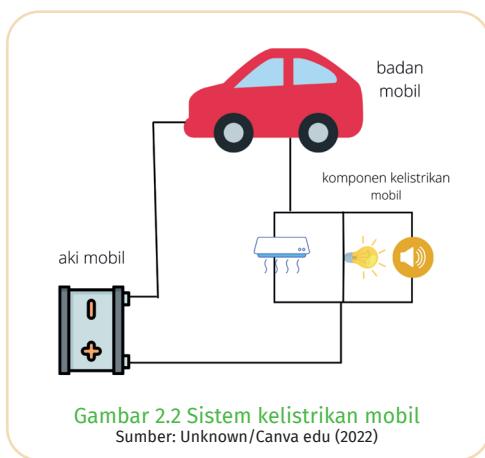
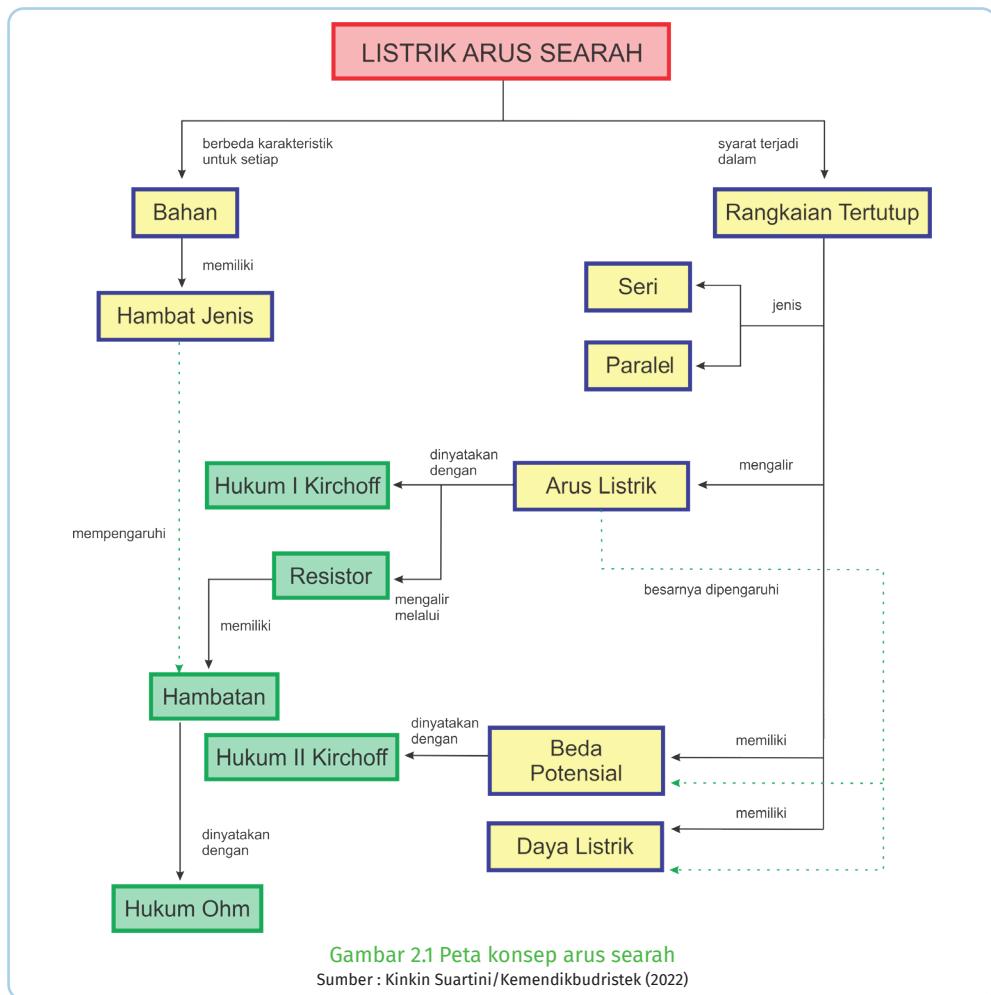
## LISTRIK ARUS SEARAH

### Kata Kunci

Hukum Ohm • Hukum Kirchoff • Hambatan jenis • Rangkaian seri • Rangkaian Paralel • Daya listrik

#### Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, kalian dapat mengevaluasi berbagai jenis rangkaian listrik arus searah menggunakan hukum Ohm, hukum Kirchoff, hambatan jenis kawat, dan daya listrik serta membuat proyek sederhana terkait rangkaian listrik arus searah untuk menyelesaikan masalah dalam kehidupan sehari-hari.



Energi listrik merupakan salah satu energi utama dalam kehidupan sehari-hari. Selain digunakan pada berbagai alat rumah tangga dan penerangan, energi listrik juga digunakan pada kendaraan. Misalnya, pada mobil energi listrik digunakan untuk memberikan percikan api pada steker sehingga mobil dapat dihidupkan. Selain itu, energi listrik digunakan untuk menyalaikan lampu, radio

dan komponen elektronik mobil lainnya. Rangkaian listrik pada mobil memanfaatkan rangkaian badan mobil sebagai bagian dari rangkaian sistem

ini dikenal sebagai pentanahan. Keuntungan dari sistem ini, yaitu untuk menghemat kawat dan memudahkan mendeteksi kerusakan pada komponen kelistrikan mobil.

Rangkaian lampu-lampu, radio, AC dan komponen kelistrikan lainnya pada mobil dirangkai secara paralel sehingga saat satu komponen mati, komponen lain masih bisa menyala. Pada kelistrikan mobil terdapat dua sumber tegangan listrik yaitu aki dan dinamo. Sebelum mobil hidup, hanya aki yang berperan sebagai sumber tegangan listrik. Tapi saat mobil sudah melaju, selain aki, dinamo juga akan menjadi sumber tegangan bagi semua komponen kelistrikkannya. Rangkaian kelistrikan saat mobil melaju ini merupakan rangkaian majemuk.



Ayo, Bernalar Kritis!

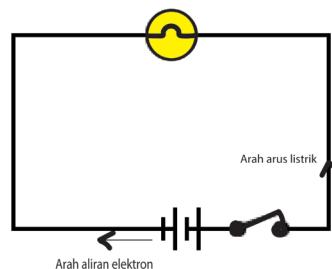
Bagaimanakah prinsip kerja sistem kelistrikan mobil?  
Mengapa saat satu komponen mati, komponen lain masih menyala?

## A. Arus Listrik

Pada bab 1, sudah dibahas jika sebuah muatan berada dalam medan listrik, maka muatan akan mengalami gaya listrik dan kemungkinan muatan tersebut bergerak. Medan listrik dapat dihasilkan oleh beda potensial listrik, misalnya pada baterai.

Gambar 2.3 menunjukkan elektron akan bergerak dalam kawat konduktor yang dihubungkan dengan baterai. Beda potensial listrik pada ujung-ujung baterai menyebabkan elektron bebas dalam kawat bergerak melewati penampang kawat yang tegak lurus terhadap arah geraknya. Aliran muatan ini dikenal sebagai **arus listrik**.

Muatan listrik yang bergerak memang elektron, tapi arah arus listrik dianggap berlawanan dengan arah aliran muatan elektronnya. Oleh karena itu, arah arus listrik ini dikenal dengan arah arus konvensional. Arah muatan elektron dalam rangkaian tertutup mengalir dari kutub negatif baterai ke kutub positif sedangkan arus listriknya mengalir dari kutub positif ke kutub negatif baterai. Perlu diingat bahwa tidak semua elektron yang bergerak menghasilkan arus listrik. Lalu apa syarat terjadinya arus listrik?



Gambar 2.3 Arah arus listrik

Sumber: Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Arus listrik  $I$  didefinisikan sebagai jumlah muatan  $Q$  per satuan waktu  $t$  yang melewati penampang kawat,

$$I = \frac{Q}{t} \quad (2-1)$$

dengan satuan arus listrik adalah coulomb per sekon. Satu coulomb per sekon disebut **ampere**, yaitu satuan arus listrik secara Standar Internasional. Nama satuan ini diambil dari matematikawan Prancis André-Marie Ampère (1775–1836) yang dikenal sebagai pelopor dalam ilmu elektrodinamika.

Besar muatan merupakan kelipatan bilangan bulat dari muatan elementer ( $e$ ), maka persamaan arus listrik dapat dituliskan juga sebagai:

$$I = \frac{ne}{t} \quad (2-2)$$

dengan  $n$  yaitu jumlah muatan dan  $e$  adalah muatan elementer  $1,6 \times 10^{-19}$  C.



#### Ayo, Cek Pemahaman!

Sebuah lampu yang diberi sumber tegangan mengalirkan arus listrik sebesar 5 A selama 30 menit. Berapa jumlah muatan elektron yang mengalir dalam lampu?

## B. Hambatan Ohmik dan Non Ohmik



#### Ayo, Bernalar Kritis!

Sebuah *Light Emitting Diode (LED)* agar menyala normal membutuhkan beda potensial 2,2 V. Sementara baterai yang ada di pasaran hanya 1,5 V dan 9 V. Bagaimana cara agar mendapatkan beda potensial 2,2 V pada ujung-ujung LED? Apa yang akan terjadi pada LED jika langsung dihubungkan dengan baterai 9V?

Komponen elektronik yang dapat digunakan untuk mengatur arus listrik dalam rangkaian adalah resistor. Sebuah resistor memiliki **resistansi** atau **hambatan** dengan satuan ohm atau  $\Omega$ . Selain resistor yang memiliki nilai hambatan, kawat juga memiliki nilai hambatan. Demikian juga bola lampu (bohlam) karena di dalamnya terdapat kawat tipis yang memiliki hambatan.

Georg Simon Ohm (1789-1854) melakukan percobaan dan mendapatkan hasil percobaan hubungan tegangan  $V$  – arus  $I$  berupa garis lurus, persamaan garisnya dikenal dengan hukum Ohm,

$$V = IR \quad (2-3)$$

dengan  $R$  merupakan gradien garisnya yaitu besar hambatan (ohm atau  $\Omega$ ),

Alat-alat listrik yang memiliki nilai hambatan tetap dengan grafik linier antara tegangan dan arus memenuhi hukum Ohm sehingga dikenal dengan **hambatan ohmik**. Tidak semua nilai hambatan bernilai tetap atau memenuhi hukum Ohm, ada juga yang berubah bergantung pada besaran lainnya. Hambatan dengan nilai berubah disebut hambatan **non-ohmik**, contohnya lampu filamen. Lampu filamen memancarkan cahaya setelah filamen kawat di dalamnya menjadi panas, memiliki hambatan yang tidak konstan namun dipengaruhi oleh suhu kawat (bagian ini akan dibahas lebih lanjut pada subbab C).

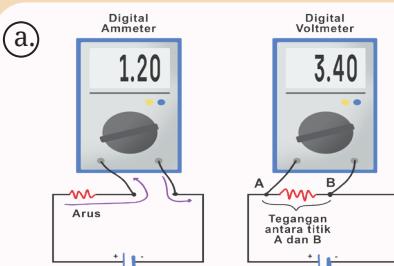
Berbeda dengan lampu filamen yang memancarkan cahaya karena pemanasan, LED akan memancarkan cahaya *monokromatik* ketika dihubungkan dengan tegangan pada kondisi panjar maju (akan dibahas lebih lanjut pada Bab 6). Jika sebuah resistor dan LED dihubungkan dengan sumber tegangan dalam rangkaian tertutup, maka arus listrik akan mengalir.

Bagaimana karakteristik beda potensial listrik sumber ( $V$ ) dan arus listrik ( $I$ ) yang mengalir pada resistor dan LED? Apakah ada perbedaan? Lakukan Aktivitas 2.1 untuk mengetahuinya. Tapi sebelumnya, coba ingat kembali cara memasang amperemeter dan voltmeter dalam rangkaian serta cara membacanya.



Ayo, Mengingat Kembali!

**Amperemeter** merupakan alat untuk mengukur nilai arus listrik. Amperemeter harus dirangkai secara seri. **Voltmeter** merupakan alat untuk mengukur beda potensial atau tegangan. Berbeda dengan amperemeter, voltmeter harus dirangkai secara paralel.



Berbeda dengan alat ukur digital yang hanya dibaca dari angka pada layar, voltmeter dan amperemeter analog perlu dibaca lebih teliti.

Cara membaca nilai yang terukur dari amperemeter dan voltmeter, yaitu:

$$Hasil\ Ukur = \frac{\text{skala\ ditunjuk}}{\text{skala\ maksimum}} \times \text{batas\ ukur}$$

Pada gambar voltmeter di atas,

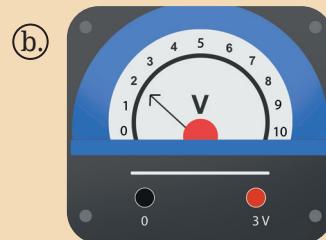
$$Hasil\ Ukur = \frac{2}{10} \times 3\ V = 0,6\ V$$

**Gambar 2.4 Merangkai alat ukur listrik**

Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

a. Mengukur Arus Listrik

b. Mengukur tegangan antara Titik A dan B



**Gambar 2.5 Voltmeter analog**

Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)



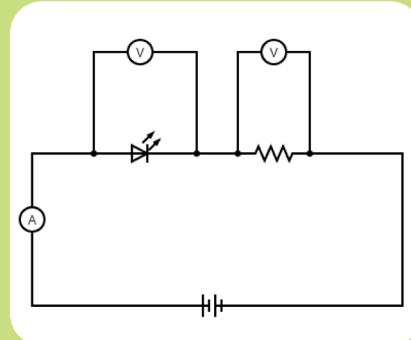
### Aktivitas 2.1. Hambatan Ohmik dan Non-Ohmik

#### Tujuan:

Membedakan karakteristik hubungan tegangan – arus pada resistor dan lampu LED.

#### Alat dan Bahan:

- sebuah resistor,
- sebuah lampu LED (merah / kuning / hijau / bening),
- baterai,
- papan rangkaian,
- kabel,
- voltmeter/ amperemeter/ multimeter.



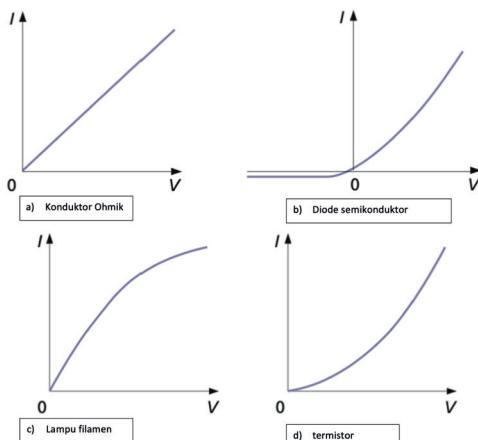
**Gambar 2.6 Rangkaian resistor-LED**

Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikburistek (2022)

### Langkah Kegiatan:

1. Buat rangkaian seperti Gambar 2.6.
2. Baca nilai tegangan pada LED, tegangan pada resistor dan arus listrik yang terukur pada rangkaian.
3. Ubah nilai tegangan sumber (tambah baterainya), ukur kembali nilai tegangan dan arus yang terukur.
4. Tuliskan data pada tabel pengamatan.
5. Gunakan minimal 4 nilai tegangan yang berbeda.
6. Berdasarkan data yang diperoleh pada tabel, buat dua grafik:
  1. grafik tegangan terhadap arus listrik untuk resistor
  2. grafik tegangan terhadap arus listrik untuk LED
7. Bandingkan kedua grafik, kemudian analisis perbedaan karakteristik hambatan resistor dan lampu LED berdasarkan grafik tersebut.

Perbedaan grafik tegangan-arus listrik pada hambatan ohmik, lampu filamen, bahan semikonduktor, dan termistor terlihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Grafik V-I beberapa jenis bahan  
Sumber : Tom Duncan/IGCSE Physics (2014)

Grafik bahan semikonduktor, lampu filamen dan termistor bukan grafik fungsi linier sehingga tidak memenuhi hukum Ohm.

Pada lampu filamen, grafik  $V$ - $I$  pada batas tertentu melengkung ketika tegangannya meningkat. Hambatannya akan meningkat ketika arusnya meningkat dan menyebabkan filamen semakin panas. Pada diode

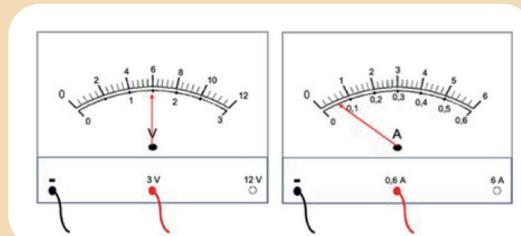
semikonduktor, arus listrik akan mengalir ketika terdapat beda potensial pada satu arah tertentu. Diode memiliki hambatan yang sangat kecil pada satu arah tertentu dan hambatannya sangat besar pada kebalikannya. Adapun pada termistor, hambatannya akan menurun ketika suhunya meningkat. Rangkaian termistor dan resistor ini biasa digunakan untuk mengatur suhu, misalnya pada radiator mobil.



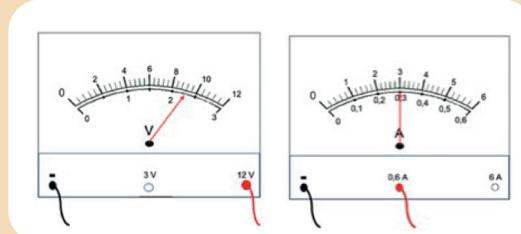
### Ayo, Cek Pemahaman!

- Seorang siswa melakukan penyelidikan untuk menentukan hambatan sebuah kawat dengan menghubungkannya pada 3 baterai yang berbeda tegangannya. Hasil pengamatan masing-masing terlihat pada Gambar 2.8.

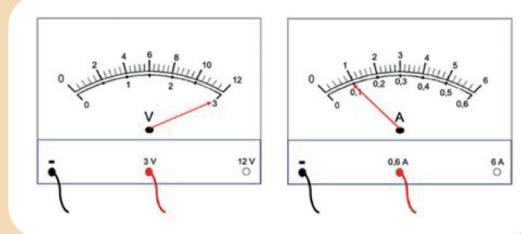
Pengamatan ke-1 :



Pengamatan ke-2 :



Pengamatan ke-3 :



**Gambar 2.8 Membaca alat ukur**  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Berdasarkan Gambar 2.8, buat tabel hasil pengamatan dan grafiknya, kemudian tentukan hambatan resistor tersebut, lengkap dengan nilai ketidakpastiannya.

2. Sebuah lampu memiliki tegangan ( $V_L = 2,1\text{ V}$ ) dan arusnya sebesar  $20\text{ mA}$  akan dihubungkan dengan baterai  $9\text{ V}$ . Agar lampu menyala dengan baik, tentukan hambatan resistor yang diperlukan pada rangkaian.

## C. Hambatan Jenis

Pada subbab A dan B, sudah dibahas tentang arus listrik yang dapat mengalir hanya pada rangkaian tertutup. Cara membuat rangkaian listrik tertutup, biasanya satu komponen dihubungkan menggunakan kawat tembaga karena merupakan pengantar listrik yang baik. Selain jenis kawat, dalam kehidupan sehari-hari ukuran kawat juga sangat diperhatikan ketika digunakan sebagai pengantar listrik.



**Ayo, Bernalar Kritis!**

Kabel pengantar dari pusat sumber tegangan ke rumah-rumah menggunakan ukuran diameter kawat besar sedangkan pada sekring digunakan ukuran diameter kawat yang sangat tipis. Menurut kalian, apa tujuan dari pemilihan ukuran ini?

Lakukan Aktivitas 2.2 untuk mengetahui pengaruh ukuran kawat dan jenis kawat terhadap hambatan kawat, secara berkelompok.



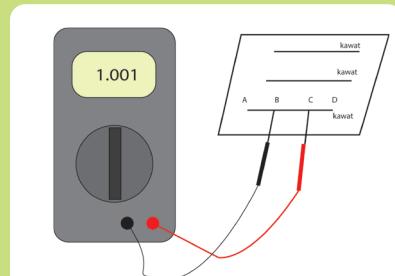
**Aktivitas 2.2.**

### Tujuan:

Menentukan faktor-faktor yang mempengaruhi hambatan kawat.

### Alat dan Bahan:

- 60 cm kawat nikrom (diameter  $0,1\text{ mm}$ ,  $0,5\text{ mm}$  dan  $1\text{ mm}$ )
- kawat konstantan (diameter  $0,5\text{ mm}$ )
- papan / alat
- paku/pengait/peniti
- penggaris/millimeter blok
- multimeter (resistansi meter).



**Gambar 2.9 Eksperimen hambatan jenis**  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

**Kegiatan:**

1. Buat rangkaian seperti Gambar 2.9.
2. Buat rancangan langkah-langkah penyelidikan dan lakukan pengamatan untuk menemukan faktor-faktor yang mempengaruhi hambatan kawat.

Besaran fisis yang menyatakan karakteristik kawat dalam kelistrikan dikenal dengan hambatan jenis ( $\rho$ ), yaitu hambatan yang dimiliki oleh sebuah kawat penghantar sepanjang satu meter tiap luas penampang  $1\text{ m}^2$ . Hambatan jenis sebuah penghantar dinyatakan dalam persamaan

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

dengan  $R$  yaitu hambatan kawat ( $\Omega$ ),  $\rho$  adalah hambatan jenis kawat ( $\Omega\text{m}$ ),  $l$  yaitu panjang kawat dan  $A$  adalah luas penampang kawat ( $\text{m}^2$ ). Berdasarkan persamaan tersebut dapat diketahui bahwa semakin kecil hambatan jenis sebuah kawat logam, maka semakin kecil hambatannya sehingga semakin baik dijadikan sebagai penghantar listrik.

Hambatan jenis konduktor bergantung pada suhu. Pada konduktor, semakin besar perubahan suhu maka hambatan jenisnya semakin besar sedangkan pada bahan semikonduktor sebaliknya. Hambatan jenis ( $\rho$ ) bahan penghantar umumnya bergantung terhadap perubahan suhu ( $\Delta T$ ) dan dapat dinyatakan dengan hubungan :

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha \Delta T]$$

atau hambatannya :

$$R = R_0 [1 + \alpha \Delta T]$$

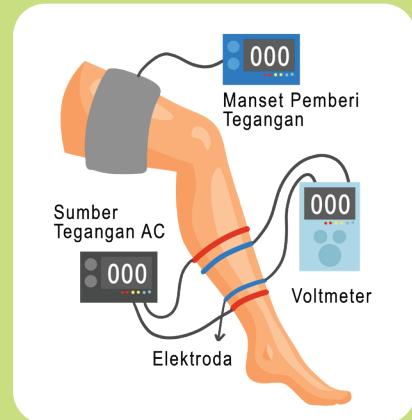
dengan  $R$  adalah hambatan (ohm),  $R_0$  adalah hambatan awal (ohm),  $\Delta T$  adalah perubahan suhu ( $^\circ\text{C}$ ) dan  $\alpha$  adalah koefisien suhu hambatan jenis (/  $^\circ\text{C}$ ).

Berbeda dengan bahan konduktor, hambatan bahan semikonduktor akan mengalami penurunan dengan meningkatnya suhu.

**Aktivitas 2.3. Ayo, Berdiskusi!**

Konsep hambatan jenis atau resistivitas, selain digunakan pada penentuan jenis kawat berbagai kebutuhan atau keamanan jaringan

Saat seseorang mengalami gangguan paru-paru atau perubahan aliran darah yang ditunjukkan dengan adanya pembekuan darah pada bagian kaki, dokter akan menyarankan untuk mendapatkan tes pletismograf (*plethysmography*). Tes ini menggunakan elektroda untuk mengukur tegangan sepanjang volume betis yang ditentukan sehingga dapat diprediksi apakah terjadi pembekuan darah atau tidak. Coba diskusikan bagaimana prinsip kerja alat pletismografi ini secara lebih lengkap termasuk persamaannya.

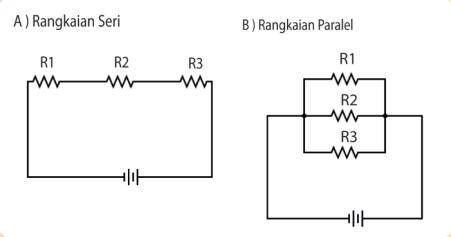


Gambar 2. 10 Pletismografi  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

secara lebih lengkap termasuk persamaannya

## D. Rangkaian Listrik

Resistor yang ada di pasaran banyak jenisnya dengan nilai hambatan yang bervariasi. Sebagian besar produk teknologi, rangkaianya tidak hanya terdiri dari satu resistor, tapi beberapa resistor yang dirangkai secara seri atau paralel.

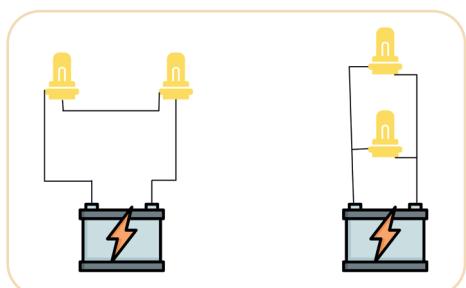


Gambar 2. 11 Rangkaian resistor  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



Ayo, Bernalar Kritis!

Jika dua lampu mobil identik dihubungkan dengan aki sesuai Gambar 2.12, rangkaian mana yang akan menghasilkan nyala lampu lebih terang?



Gambar 2. 12 Dua rangkaian lampu  
Sumber : Unknow/Canva Edu (2022)



## Ayo, Ingat Kembali!

### Rangkaian Seri-Paralel

Pada rangkaian seri resistor  $R_1$ ,  $R_2$  dan  $R_3$  yang dihubungkan dengan sumber tegangan  $\varepsilon$ , pada ujung-ujung resistor terdapat tegangan  $V_1$ ,  $V_2$  dan  $V_3$ . Jumlah tegangan total dari masing-masing resistor sama dengan besar GGL sumber tegangan yang diberikan atau tegangan total,

$$V_{tot} = V_1 + V_2 + V_3$$

Substitusikan persamaan hukum Ohm  $V = IR$ , maka:

$$I_{tot} R_{seri} = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3$$

Pada rangkaian seri seperti gambar 2.11 A, dalam rangkaian tidak ada percabangan,

$$I_{tot} = I_1 = I_2 = I_3$$

maka:

Besar hambatan total rangkaian seri:

$$R_{seri} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Pada rangkaian paralel resistor  $R_1$ ,  $R_2$  dan  $R_3$  yang dihubungkan dengan sumber tegangan  $V$ , pada setiap cabang mengalir arus listrik  $I_1$ ,  $I_2$  dan  $I_3$ . Jumlah arus total dari masing-masing resistor sama dengan,

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + I_3$$

Substitusikan persamaan  $I = \frac{V}{R}$  maka:

$$\frac{V_{tot}}{R_{par}} = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}$$

Sedangkan tegangan ujung-ujung resistor sama dengan **GGL** baterai atau  $V_{tot}$ .

$$V_{tot} = V_1 = V_2 = V_3$$

Besar hambatan total **rangkaian paralel**:

$$\frac{1}{R_{par}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$



#### Aktivitas 2.4. Merancang Rangkaian Lampu

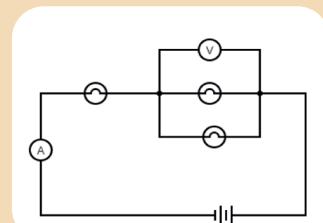
Jika kalian diberikan 5 buah lampu yang masing-masing akan menyala pada tegangan 2,1 V, tapi kali ini akan dihubungkan dengan sebuah sumber tegangan 9 V. Diskusikan berbagai rancangan rangkaian seri-paralel dari 5 lampu tersebut agar semua lampu menyala dengan optimal (semua lampu menyala normal namun tidak rusak). Kemudian analisis apakah rangkaian tersebut memerlukan komponen lain seperti resistor. Evaluasi masing-masing rangkaian kemudian tentukan rancangan mana yang menghasilkan nyala semua lampu optimal.



#### Ayo, Cek Pemahaman!

Tiga lampu identik dirangkai seperti Gambar 2.13. Jika amperemeter menunjukkan angka 0,6 A dan voltmeter menunjukkan 3 V, maka:

- tentukan besar hambatan masing-masing lampu dan tegangan baterai yang digunakan!
- jika lampu A dilepaskan, bagaimana nyala lampu B dan C?
- jika lampu C dilepaskan, bagaimana nyala lampu A dan B?

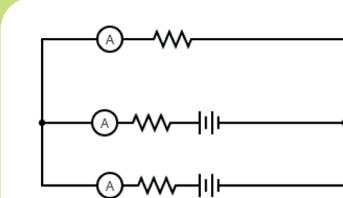


Gambar 2. 13 Rangkaian 3 lampu  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

## E. Rangkaian Majemuk



#### Aktivitas 2.5.



Gambar 2. 14 Rangkaian majemuk  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Buat sebuah rangkaian yang terdiri dari 3 resistor dan dua baterai seperti gambar 2.14. Ukur arus pada setiap cabang dan tegangannya. Gunakan tabel untuk menuliskan data-data yang diukur.

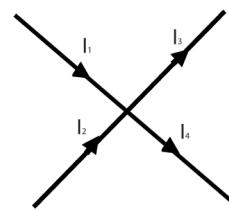
Jawab pertanyaan-pertanyaan berikut:

1. bagaimana hubungan arus listrik yang terukur pada masing-masing cabang ( $i_1$ ,  $i_2$  dan  $i_3$ )?
2. bagaimana hubungan tegangan yang terukur antara titik AB, BC dan AC ( $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  dan  $V_{AC}$ )?
3. bagaimana tegangan antara titik C dan A ( $V_{CA}$ )?

Gustav Kirchoff (1824–1887) menyatakan dua hukum yang dikenal dengan Hukum Kirchoff yaitu yang pertama tentang arus pada percabangan dan yang kedua tentang tegangan pada rangkaian tertutup.

Hukum pertama Kirchoff menyatakan bahwa jumlah arus yang masuk menuju titik cabang sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik cabang tersebut. Hukum pertama Kirchoff dinyatakan dalam persamaan.

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$



Gambar 2.15 Percabangan arus  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Hukum Kedua Kirchoff merupakan salah satu contoh hukum kekekalan energi dalam bentuk energi potensial listrik. Kirchoff menyatakan bahwa *dalam rangkaian tertutup, jumlah tegangan sama dengan jumlah GGL ( $\sum \varepsilon$ ) di dalam rangkaian tersebut,*

$$\sum \varepsilon = \sum I.R$$

Hukum kedua Kirchoff menyatakan bahwa pada rangkaian tertutup, tegangan dalam satu loop (dari titik x kembali ke titik x) adalah nol,

$$V_{xx} = 0$$

Kemudian besar tegangan antara dua titik A dan B bisa dinyatakan sebagai:

$$\sum V_{AB} = \sum \varepsilon + \sum I.R$$

Hukum kedua Kirchoff dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan rangkaian seri, paralel, maupun rangkaian majemuk.

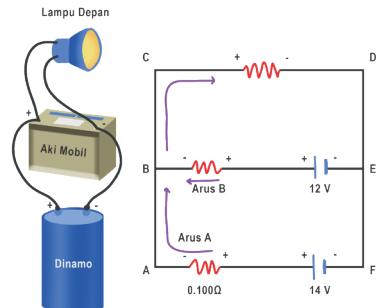
### Perjanjian Tanda untuk Loop

Arus searah loop,  $I +$  (arus positif), loop bertemu kutub positif sumber tegangan,  $\Sigma +$  (tegangan positif).



Ayo, Cermati!

Dalam sebuah mobil, lampu depan mobil terhubung dengan aki dan alternator (dinamo) yang juga berfungsi sebagai sumber energi listrik saat mobil sudah dihidupkan. Gambar dibawah menunjukkan bagaimana lampu depan, aki dan alternator dihubungkan.



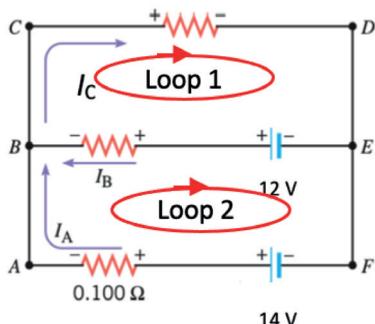
**Gambar 2.16 Rangkaian kelistrikan mobil**  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistik (2022)

Alternator memiliki ggl sebesar  $\varepsilon_1 = 14$  V dan hambatan dalam  $R_1 = 0,1 \Omega$  saat mobil sudah hidup, Aki mobil memiliki ggl sebesar  $\varepsilon_2 = 12$  V dan hambatan dalam  $R_2 = 0,01 \Omega$  sedangkan lampu depan mobil memiliki hambatan  $R_L = 1,20 \Omega$ . Tentukan arus yang mengalir pada alternator ( $I_A$ ), aki ( $I_B$ ) dan lampu depan mobil ( $I_C$ ).

## Cara Penyelesaian:

## Langkah Pertama:

Buat dua loop pada rangkaian atas dan bawah. Kemudian, gunakan persamaan hukum kedua Kirchoff untuk masing-masing loop.



Pada loop 1:

- terdapat ggl  $\varepsilon_2 = 12$  V, (loop bertemu kutub -, maka ggl  $\varepsilon_2 =$  negatif),
  - hambatan R1 dengan arah arus  $I_c$  searah loop 1,  $I_c$  positif,
  - hambatan R2 dengan arah arus  $I_R$  searah loop 1,  $I_R$  positif.

maka tegangan dari titik B ke titik B:

$$\begin{aligned} V_{BB} &= 0 \\ -\varepsilon_2^+ I_C R_L + I_B R_2 &= 0 \\ -12 + I_C 1,2 + I_B 0,01 &= 0 \\ 1,2 I_C + 0,01 I_p &= 12 \quad \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

Pada loop 2:

- terdapat  $\text{ggl } \varepsilon_1 = 14 \text{ V}$ , (loop bertemu kutub -, maka  $\text{ggl } \varepsilon_1 = \text{negatif}$ ),
  - terdapat  $\text{ggl } \varepsilon_2 = 12 \text{ V}$ , (loop bertemu kutub +, maka  $\text{ggl } \varepsilon_2 = \text{positif}$ ),
  - hambatan  $R_2$  dengan arah arus  $I_B$  berlawanan loop 2,  $I_B$  negatif,
  - hambatan  $R_1$  dengan arah arus  $I_R$  searah loop 2,  $I_A$  positif.

maka tegangan dari titik A ke titik A:

$$\begin{aligned} V_{AA} &= 0, \\ -\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 - I_B R_2 + I_A R_1 &= 0 \\ -14 + 12 - I_B 0,01 + I_A 0,1 &= 0 \\ 0,1 I_A - 0,01 I_B &= 2. \end{aligned} \quad (2)$$

Selanjutnya gunakan hukum pertama Kirchoff mengenai arus yang melalui titik cabang. Perhatikan titik B, arus mana saja yang masuk ke titik B dan arus mana saja yang keluar dari titik B?

Kita dapat melihat:

$$I_A + I_B = I_C \dots \dots \dots \quad (3).$$

Sekarang substitusi persamaan (3) ke persamaan (1) diperoleh:

$$1,2 I_C + 0,01 I_B = 12$$

$$1,2 (I_A + I_B) + 0,01 I_B = 12$$

$$1,2 I_A + 1,21 I_B = 12 \dots \text{pers. (4)}$$

Sekarang eleminasi persamaan (2) dan persamaan (4), maka:

$$\begin{array}{rcl}
 0,1 I_A - 0,01 I_B = 2 & \text{x } 1,21 & | \quad 0,121 I_A - 0,0121 I_B = 2,42 \\
 1,2 I_A + 1,21 I_B = 12 & \text{x } 0,01 & | \quad 0,012 I_A + 0,0121 I_B = 0,12 \\
 \hline
 & & 0,133 I_A = 2,54 \\
 & & I_A = 19,1 \text{ A}
 \end{array} +$$

Jadi, arus yang mengalir melalui akumulator adalah 19,1 A. Sedangkan arus pada aki ( $I_R$ ) sebesar:

$$0,1 I_A - 0,01 I_B = 2$$

$$0,1 (19,1) - 0,01 I_B = 2$$

$$I_B = (1,91 - 2) / 0,01 = -9 \text{ A}$$

dan arus yang melewati lampu depan mobil ( $I_c$ ) adalah:

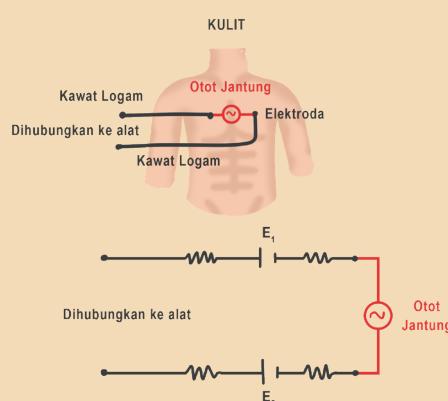
$$I_C = I_A + I_B$$

Tanda negatif pada  $I_B$  berarti arus yang mengalir pada aki berlawanan dengan arah yang sudah kita gambarkan.



### Ayo, Cek Pemahaman!

Elektrokardiogram (EKG) merupakan pemeriksaan yang dilakukan untuk mengukur aktivitas listrik jantung. Pemeriksaan ini biasa dilakukan untuk mengetahui kondisi kesehatan jantung berdasarkan irama sinyal tegangan yang dihasilkan otot jantung.



Gambar 2.17 Rangkaian EKG  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

Rangkaian EKG secara lengkap cukup kompleks, namun sederhananya rangkaian dapat digambarkan seperti Gambar 2.17. Resistor  $R_{kontak1}$  dan  $R_{kontak2}$  merupakan hambatan yang terjadi antara logam dari alat elektrograf dengan kulit pada titik alat dipasang, sedangkan  $R_{jaringan}$  merupakan hambatan antara elektroda kontak dengan otot jantung.  $E_1$  dan  $E_2$  merupakan

tegangan yang timbul akibat reaksi kimia antara logam dan kulit manusia.

Gunakan Hukum Kirchoff, coba jelaskan bagaimana alat elektrograf membaca sinyal tegangan yang dihasilkan jantung ( $V_{AB} = V_{jantung}$ ).

## F. Daya Listrik

Produk elektronik yang ada pada umumnya diberi spesifikasi watt untuk membedakan satu dengan yang lainnya. Misalnya pada lampu: ada yang 5 watt, 10 watt, dan seterusnya. Demikian juga pada sepiker, setrika, mesin cuci dan televisi. Satuan watt (W) merupakan satuan dari **daya listrik**.



### Aktivitas 2.6.

Perhatikan satuan daya listrik yang digunakan di rumah. Meskipun sumber arus listrik yang digunakan adalah arus bolak-balik (akan dibahas pada Bab 4), tapi pada dasarnya prinsip penggunaan konsep daya listrik adalah sama. Pada umumnya dinyatakan volt ampere (VA). Berdasarkan satuan ini, dapatkah kalian menentukan hubungan antara daya, tegangan, dan arus listrik? Coba analisis konsumsi daya listrik tiap bulan di rumah masing-masing, lalu tentukan biaya bulanan listrik yang harus dibayarkan.

Sama halnya dengan ketika belajar tentang energi dan daya pada bab mekanika, dalam hal kelistrikan, daya listrik juga merupakan energi tiap satuan waktu. Yang biasanya dinyatakan dalam volt ampere. Sebuah komponen jika dihubungkan dengan sumber tegangan, maka muatan pada komponen akan bergerak dari potensial tinggi menuju potensial yang lebih rendah. Energi potensial yang dimiliki muatan yang berada dalam beda potensial,

$$E = qV$$

Daya listrik dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$P = \frac{\text{Energi}}{\text{waktu}} = \frac{E}{t} = \frac{qV}{t}$$

Pada sub bab A, sudah dibahas bahwa arus listrik,  $I = \frac{q}{t}$  maka:

daya listrik  $P$  pada rangkaian dengan besar arus listrik  $I$  dan tegangan  $V$  sebesar :

$$P = VI$$

dengan  $P$  adalah daya listrik dalam watt.

Substitusikan persamaan hambatan, sehingga daya listrik juga dapat dinyatakan dengan:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad \text{atau} \quad P = I^2 R$$

Besar daya listrik yang digunakan di rumah dinyatakan dalam kWh (*kilo watt hour*). Setiap kWh dibebankan biaya tertentu sehingga semakin besar konsumsi daya listrik, biaya yang harus dikeluarkan semakin besar.



## Proyek

Pada akhir Bab 2 ini, Kalian diminta untuk membuat sebuah produk yang mengaplikasikan rangkaian kelistrikan untuk menyelesaikan masalah dalam kehidupan sehari-hari.

### Contoh masalah sebagai berikut:

Di pemukiman padat penduduk sekitar bantaran sungai, bencana banjir tahunan tidak jarang memakan korban jiwa karena terjadi saat malam hari ketika orang tertidur lelap. Oleh karena itu, diperlukan alarm banjir skala rumah tangga yang dapat diproduksi oleh setiap orang dengan biaya murah, aman, dan memberi peringatan saat terjadi banjir. Bagaimana rancangan alat ini dan alat apa saja yang dibutuhkan?

### Rangkuman

1. Arus listrik didefinisikan sebagai jumlah muatan per satuan waktu yang melewati penampang kawat,

$$I = \frac{Q}{t}$$

2. Pada resistor yang memenuhi hukum Ohm, berlaku:

$$V = IR$$

3. Hambatan total resistor yang dirangkai seri:

$$R_{\text{seri}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

4. Hambatan total resistor yang dirangkai paralel:

$$\frac{1}{R_{\text{par}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

5. Hukum I Kirchoff menyatakan bahwa pada setiap percabangan, arus listrik total yang masuk ke titik percabangan sama dengan arus total yang keluar dari titik percabangan.

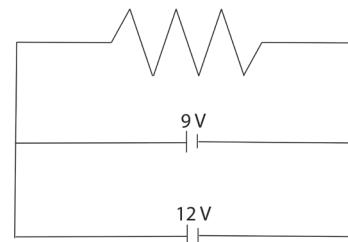
- Hukum II Kirchoff menyatakan bahwa pada rangkaian tertutup, jumlah gaya gerak listrik (GGL) sama dengan jumlah beda potensial di dalam rangkaian.
- Daya listrik pada suatu rangkaian dengan arus listrik  $I$  dan tegangan  $V$ , yaitu:  $P = VI$ .

### Asesmen

- Perhatikan data hambatan jenis beberapa logam

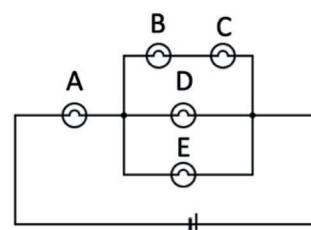
Jenis Bahan	Hambatan Jenis
Perak	$1,60 \times 10^{-8} \Omega m^3$ .
Tembaga	$1,62 \times 10^{-8} \Omega m^3$ .
Tungsten	$5,20 \times 10^{-8} \Omega m^3$ .
Besi	$10,0 \times 10^{-8} \Omega m^3$ .
Nikrom	$10,0 \times 10^{-6} \Omega m^3$ .

- Jelaskan mana yang lebih baik dijadikan sebagai pengantar listrik antara tembaga dan perak.
- Bahan mana yang kalian sarankan untuk dijadikan sebagai kawat pemanas listrik dan mengapa?
- Sebuah rangkaian listrik seperti pada Gambar 2.18 kadang digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Jika hambatan dalam baterai masing-masing adalah  $0,5 \Omega$ , tentukan arus yang mengalir pada hambatan  $100 \Omega$ .



Gambar 2. 18 Rangkaian majemuk  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

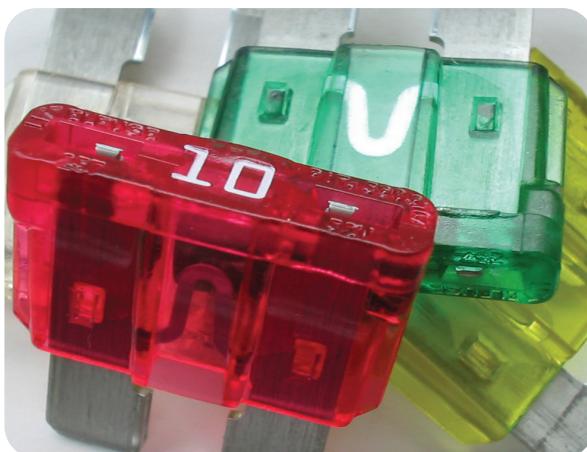
- Lima lampu identik dihubungkan dengan sebuah sumber tegangan seperti Gambar 2. 19.
- Prediksi, lampu mana yang akan menyala paling terang dan lampu mana yang menyala paling redup.



Gambar 2. 19 Rangkaian lampu  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

- b. Jika lampu E dilepaskan dari rangkaian, bagaimana nyala lampu A sekarang? Apakah menyala lebih terang atau lebih redup dibandingkan dengan sebelum lampu E dilepaskan?  
Jelaskan bagaimana kalian menganalisis hal tersebut!

#### Pengayaan



Gambar 2.20 Fuse (sekring mobil)

Sumber: Minderhoud/Wikimedia Commons (2022)

Penggunaan listrik dengan beban arus melebihi batas aman dapat menyebabkan bahaya kebakaran akibat adanya korsleting listrik. Oleh karena itu, pada kendaraan seperti mobil sering dipasang sistem pengaman arus yang dikenal dengan sekring. Sekring menggunakan bahan jenis kawat tertentu yang ketika beban arus mengalir melebihi batas aman, kawat akan terputus. Cobalah lakukan penyelidikan jenis kawat yang digunakan dalam sistem sekring dan bagaimana karakteristiknya (berdasarkan pada hambatan jenisnya), serta bagaimana karakteristik bahan yang digunakan sebagai sekring mobil?

#### Refleksi

Setelah pembelajaran Bab 2 Arus Searah:

1. Apakah kalian sudah memahami dengan baik semua materi dalam Bab 2 Arus Searah?

2. Apakah kalian sudah mampu merancang dan melakukan penyelidikan?
3. Konsep-konsep apa saja yang kalian belum dipahami pada materi arus searah?
4. Apa yang akan kalian lakukan untuk meningkatkan pemahaman terhadap materi arus searah?



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI  
REPUBLIK INDONESIA 2022**

**Fisika untuk SMA/MA Kelas XII**

Penulis : Lia Laela Sarah, Irma Rahma Suwarma

ISBN : 978-623-472-722-7 (jil.2)

Sumber: bearfotos/ freepik (2022)

# BAB 3

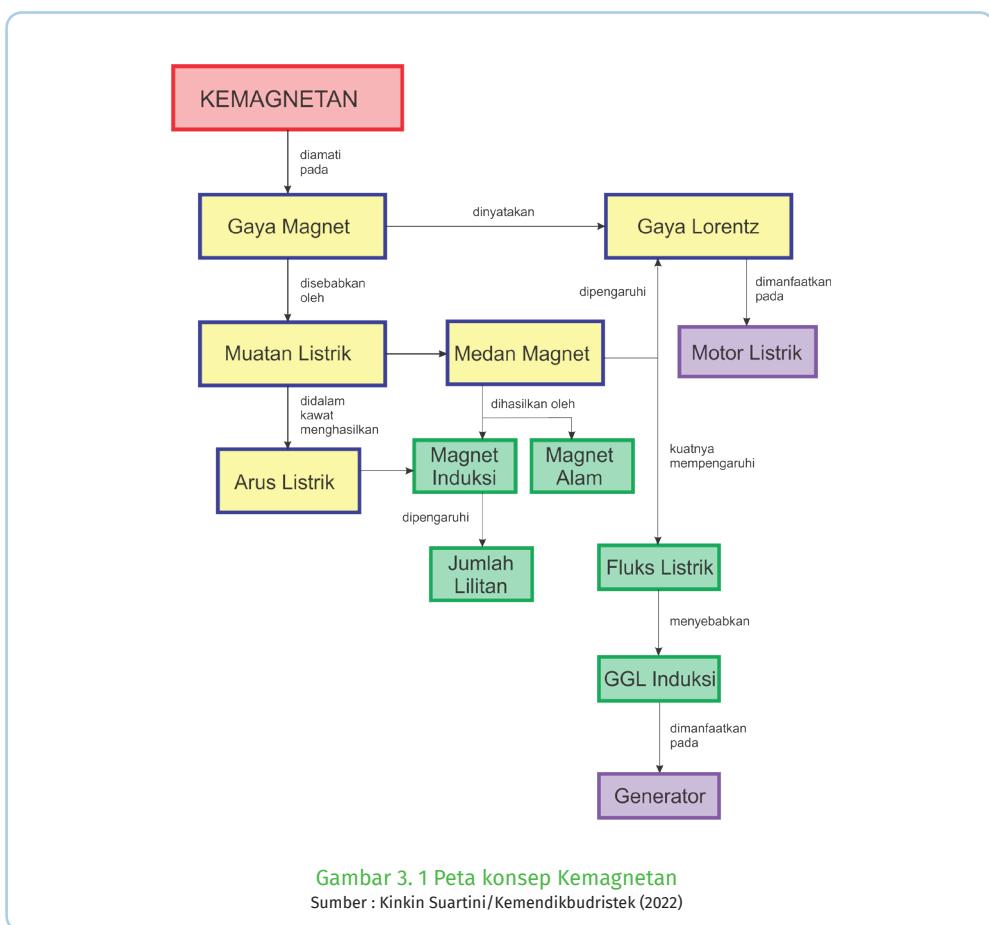
## KEMAGNETAN

### Kata Kunci

Medan Magnet • Induksi • Gaya Magnet • GGL Induksi • Induktansi • Generator • Transformator

#### Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, peserta didik dapat menerapkan konsep kemagnetan (gaya magnet, medan magnet induksi, GGL induksi, dan induktansi) pada berbagai produk teknologi serta mampu merancang dan mengembangkan alat sederhana berdasarkan konsep kemagnetan.



**Gambar 3. 2 Alat elektronik yang menggunakan elektromagnet**  
Sumber: Unknown/Canva.edu (2022)

Magnet banyak digunakan untuk menghasilkan putaran pada alat elektronik saat ini, mixer, blender, kipas angin, bahkan mobil listrik terbaru merupakan peralatan elektronik yang menggunakan prinsip kerja magnet induksi. Kalian jika membuka bagian dalam alat elektronik ini, maka kalian akan menemukan motor listrik, yaitu terdiri dari magnet dan kumparan kawat yang akan berputar saat diberi arus listrik.

Prinsip kerja motor listrik adalah mengubah energi listrik menjadi

energi mekanik (gerak). Energi gerak dihasilkan oleh gaya yang timbul karena kumparan berada di dalam medan magnet yang diberi arus listrik.



Gambar 3.3 Maglev

Sumber: Unknown/Canva.edu (2022)

Konsep medan magnet induksi dan gaya magnetik juga telah dimanfaatkan pada kereta Maglev. Gambar 3.3, teknologi transportasi modern dengan laju mencapai 600 km/jam.

Fenomena sebaliknya, yaitu ketika ada perubahan medan magnet pada kumparan ternyata menghasilkan **Gaya Gerak Listrik**

(GGL) yang dikenal induksi elektromagnetik. Fenomena ini dimanfaatkan pada generator untuk menghasilkan sumber energi listrik. Prinsip induksi elektromagnetik juga digunakan pada trafo untuk menaikan/menurunkan tegangan listrik. Penggunaan trafo sangat diperlukan dalam sistem transmisi sumber daya listrik dari pembangkit sampai ke rumah-rumah penduduk. Tegangan dari generator dinaikkan oleh trafo step-up agar mampu menjangkau jarak yang jauh ketika ditransmisikan kemudian diturunkan kembali oleh trafo step down sehingga siap digunakan.

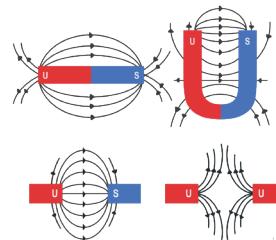


Ayo, Bernalar Kritis!

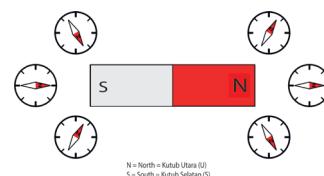
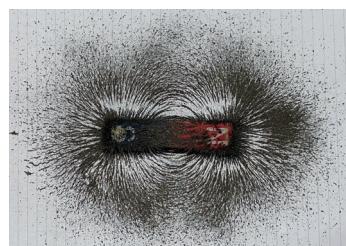
Bagaimana cara kerja kumparan menghasilkan gaya gerak listrik dan bagaimana prinsip kerja trafo sehingga dapat menaikan/menurunkan tegangan?

## A. Medan Magnet

Coba ingat kembali bahwa magnet yang kutubnya senama akan saling tolak menolak, sedangkan kutub yang berbeda akan tarik menarik. Kalian akan temukan di daerah sekitar magnet terdapat medan magnet. Saat serbuk besi ditaburkan di sekitarnya, akan terbentuk pola garis-garis seperti pada Gambar 3.5 a). Arah medan magnet di sebuah titik ditunjukkan oleh arah kompas yang diletakan pada titik tersebut, perhatikan Gambar 3.5 b).

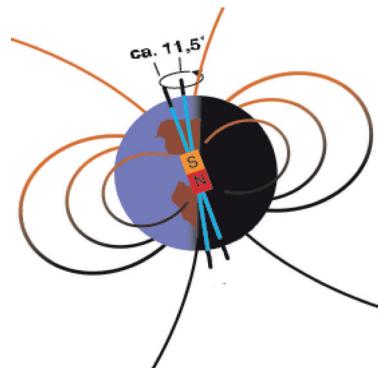


Gambar 3.4 Interaksi magnet  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)



Gambar 3.5 Medan magnet di sekitar magnet batang  
Sumber : Chetvorno / wikimedia commons (2021)

Bumi juga merupakan sebuah magnet raksasa yang memiliki medan magnet di sekitarnya. Dapat diibaratkan Bumi memiliki magnet batang di dalam inti Bumi. Kutub utara magnet Bumi berada di kutub selatan geografi Bumi sedangkan kutub selatan magnet Bumi berada di kutub utara geografi Bumi. Antara kutub utara magnet dan kutub selatan geografi Bumi tidak tepat berhimpit namun berbeda  $11,5^\circ$  seperti Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Medan magnet bumi  
Sumber: Hubi/Wikimedia Commons (2003)

Dapatkan kalian memperkirakan bagaimana magnet Bumi terbentuk?

## B. Gaya Magnet

### 1. Gaya Pada Muatan Bergerak

Pada bab 2, sudah dibahas jika sebuah muatan berada dalam medan listrik maka muatan akan mendapatkan **gaya listrik**. Hanya saja, ketika muatan berada dalam medan magnet, belum tentu muatan mendapat **gaya magnet**. Sebuah muatan dalam medan magnet akan mendapat gaya magnet jika:

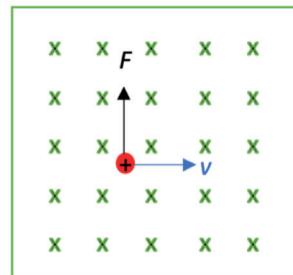
1. muatan bergerak
2. arah kecepatan muatan tidak sejajar dengan arah medan magnet.

Perhatikan Gambar 3.7, sebuah muatan positif dengan kecepatan ke kanan berada dalam medan magnet secara tegak lurus yang arahnya menembus bidang. Gaya magnet yang terjadi pada muatan ke arah vertikal tegak lurus terhadap gerak muatan dan medan magnetnya. Sama hal dengan menentukan besar medan listrik berdasarkan gaya listrik dan muatannya, besar medan magnet juga dapat ditentukan dari besar gaya magnet dan muatannya. Vektor gaya listrik ( $F$ ) pada muatan ( $q$ ) yang bergerak dengan kecepatan ( $v$ ) dalam medan magnet ( $B$ ), yaitu:

$$\vec{F} = \vec{qv} \times \vec{B} \quad (3-1)$$

atau besarnya dijabarkan menjadi:

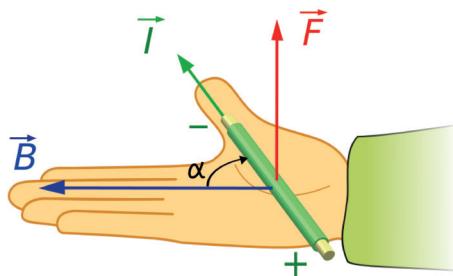
$$F = qvB \sin\theta \quad (3-2)$$



Gambar 3.7 Arah gaya magnet pada muatan  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

dengan  $F$  adalah gaya magnet pada muatan ( $N$ ) dan  $\theta$  adalah sudut antara  $v$  dan  $B$ .

Ingatlah kembali arah gerak muatan dalam medan listrik agar kalian dapat memahami perbedaan antara gerak muatan dalam medan listrik dan medan magnet. Muatan yang berada dalam medan listrik akan mendapat



Gambar 3.8 Aturan tangan kanan gaya magnet

Sumber : jfmlero / Wikimedia Commons (2009)

gaya listrik baik muatannya diam atau bergerak, sedangkan dalam medan magnet muatan yang diam tidak akan mendapatkan gaya magnet. Muatan akan mendapat gaya magnet ketika bergerak **tidak sejajar** dengan medan magnetnya.

Jika muatan bergerak tegak lurus terhadap arah medan magnet, maka arah gaya magnet dapat ditentukan dengan aturan tangan kanan.

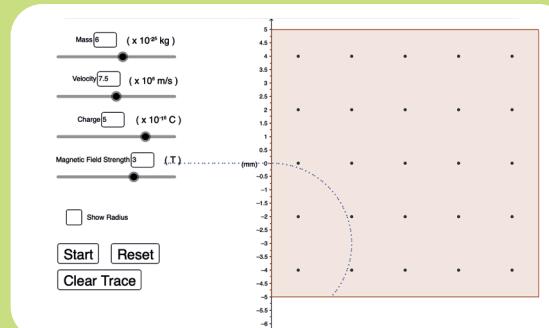
Perhatikan Gambar 3.8, ibu jari menyatakan arah kecepatan muatan, telunjuk menyatakan arah medan magnet dan telapak tangan menyatakan arah gaya magnetnya. Ketika muatan bergerak masuk ke daerah medan magnet secara tegak lurus, maka muatan akan mengalami perubahan gerak.



### Aktivitas 3.1.

Bagaimana gaya magnet yang dialami muatan dalam medan magnet?

Jika internet tersedia, buka tautan di bawah atau pindai kode QR: <https://ophysics.com/em7.html>



Tanda titik  
menunjukkan  
Arah medan keluar  
bidang kertas  
(menuju pembaca)

Gambar 3.9 Pengamatan gerak  
muatan

Sumber: Unknown/Ophysics.com(2022)

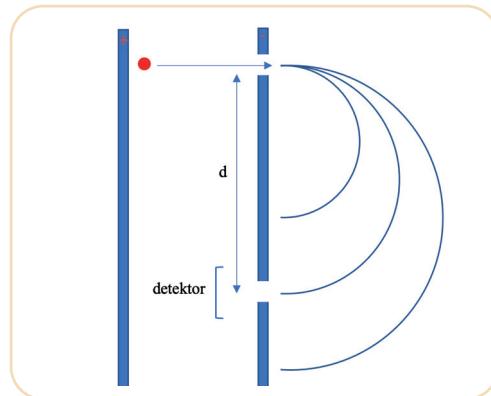
Diskusikan pertanyaan berikut:

1. Apa saja faktor yang mempengaruhi jari-jari lintasan gerak muatan?
2. Saat sebuah muatan partikel bergerak dalam medan magnet dengan lintasan berupa lingkaran, tentukan besar jari-jari lingkaran dari partikel!

Muatan yang bergerak dengan kecepatan  $v$  memasuki daerah dengan medan magnet  $B$  akan mendapatkan gaya magnet sehingga bergerak pada lintasan melingkar. Gaya magnet dalam hal ini berperan sebagai **gaya sentripetal**.

$$F_m = F_{sp}$$

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \quad (3-3)$$



Gambar 3. 10 Prinsip kerja spektrometer massa  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Persamaan (3-3) biasa digunakan pada alat **spektrometer massa** yaitu alat untuk menentukan massa dari sebuah atom. Sampel yang akan diukur diionisasi sehingga menjadi bermuatan positif, kemudian dilewatkan pada pelat dengan beda potensial  $\Delta V$  sehingga memiliki kecepatan  $v$  saat memasuki celah. Dari persamaan (3-3), massa partikel yang masuk ke celah detektor dapat ditentukan dengan:

$$\begin{aligned} qB &= \frac{mv}{r} \\ m &= \frac{qBr}{v} \end{aligned} \quad (3-4)$$

dengan  $m$  adalah massa partikel (kg),  $q$  yaitu muatan partikel (C),  $B$  adalah kuat medan magnet (Tesla),  $r$  adalah jari-jari lintasan (m) dan  $v$  adalah kecepatan partikel (m/s).

Coba kalian subsitusikan persamaan energi kinetik ( $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ) dan energi potensial listrik ( $E_p = q\Delta V$ ) untuk mendapatkan persamaan massa partikel sebagai fungsi beda potensial listriknya. Asumsikan seluruh energi potensial listriknya diubah menjadi energi kinetik.

$$\begin{aligned} E_k &= E_p \\ \frac{1}{2}mv^2 &= q\Delta V \\ v &= \dots \end{aligned} \quad \begin{aligned} m &= \frac{qBr}{v} \\ m &= \dots \end{aligned}$$

Substitusikan persamaan  $v$  pada kotak kiri ke persamaan sebelah kanan

Ketika muatan diam dalam medan listrik, muatan akan mendapatkan gaya listrik dan saat muatan bergerak dalam medan magnet muatan akan mendapatkan gaya magnet. Gaya total yang dialami muatan yang bergerak dalam medan listrik dan medan magnet, yang merupakan gabungan dari gaya magnet dan gaya listrik dikenal dengan **Gaya Lorentz**. Gaya Lorentz ( $\vec{F}$ ) pada muatan ( $q$ ) yang bergerak dalam medan listrik ( $\vec{E}$ ) dan medan magnet ( $\vec{B}$ ) adalah:

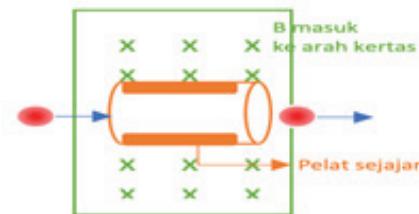
$$\vec{F} = \vec{qv} \times \vec{B} + q\vec{E} \quad (3-5)$$

Gaya Lorentz dimanfaatkan pada **pemilih kecepatan** yaitu alat untuk mengukur kecepatan muatan partikel. Alat ini menggunakan medan magnet dan medan listrik agar pada kecepatan tertentu menghasilkan gaya yang seimbang. Karena resultan gaya nol, muatan dengan kecepatan yang sesuai dapat bergerak lurus keluar melewati alat pemilih sedangkan muatan dengan kecepatan yang tidak sesuai akan dibelokan sehingga tidak mampu melewatinya.



#### Ayo, Bernalar Kritis!

Sebuah partikel bermuatan positif dalam pemilih kecepatan bergerak dengan laju  $v$  dalam medan magnet  $B$  secara tegak lurus dan melewati tabung pelat sejajar dengan medan magnet  $E$ .



**Gambar 3. 11 Pemilih kecepatan**  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Jika arah medan magnet  $B$  masuk bidang kertas seperti ditunjukkan gambar, bagaimana arah medan listrik pada pelat sejajar jika:

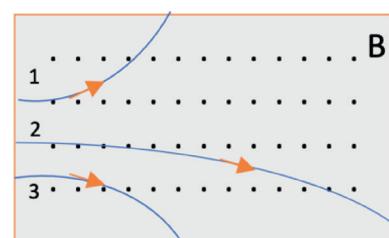
- searah dengan arah medan magnet?
- berlawanan dengan arah medan magnet?
- dari pelat atas menuju ke pelat bawah dari pelat bawah ke pelat atas?



#### Ayo, Cek Pemahaman!

Gambar 3.12 menunjukkan lintasan yang ditempuh tiga partikel bermuatan masuk ke dalam medan magnet yang arahnya keluar bidang.

- Lakukan analisis jenis muatan masing-masing lintasan, dan jelaskan alasannya



**Gambar 3. 12 Lintasan partikel bermuatan**  
Sumber : Jhon D. Cutnell/Physics 9ed (2012)

2. Dari lintasan 2 dan 3 dengan massa dan besar muatan partikel yang sama, partikel mana yang memiliki kecepatan lebih tinggi?

## 2. Gaya Magnet pada Kawat Berarus Listrik

Pada Bab 1, sudah dibahas bahwa arus listrik merupakan aliran muatan maka ketika kawat berarus listrik berada dalam medan magnet, juga akan mendapatkan gaya magnet. Dengan menggunakan persamaan gaya magnet untuk muatan yang bergerak:

$$F = qvB \sin\theta,$$

bagi persamaan dengan  $\frac{\Delta t}{\Delta t}$ , maka untuk kawat berarus dengan panjang  $l$ :

$$F = \frac{q}{\Delta t} (v\Delta t)B \sin\theta,$$

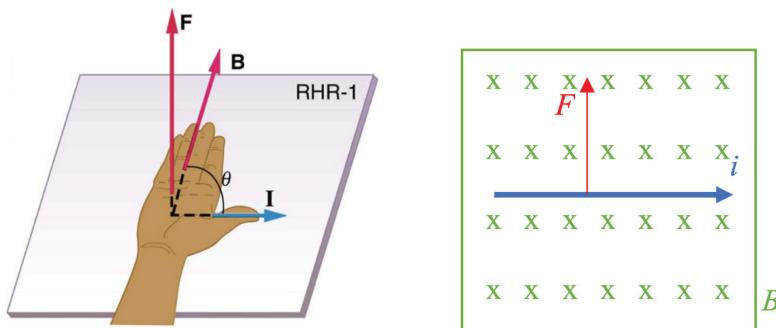
$\frac{q}{\Delta t}$  adalah besar arus listrik sedangkan  $v\Delta t$  merupakan jarak yang ditempuh muatan sepanjang kawat atau panjang kawat ( $l$ ), maka:

Besar gaya magnet pada kawat yang panjangnya  $l$  berarus listrik  $i$  dalam medan magnet  $B$  adalah:

$$F = ilB \sin\theta \quad (3-6)$$

dengan  $F$  adalah gaya magnet pada kawat (N),  $i$  adalah kuat arus listrik (A),  $l$  adalah panjang kawat (m),  $B$  adalah kuat medan magnet (Tesla), dan  $\theta$  adalah sudut antara arah kawat berarus dan medan magnet.

Arah gaya magnet yang timbul pada kawat berarus dalam medan magnet dapat ditentukan dengan aturan tangan kanan.



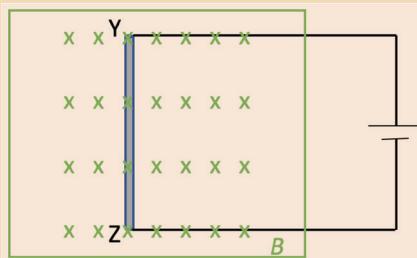
Gambar 3. 13 Aturan tangan kanan gaya magnet  
Sumber : OpenStax / Wikimedia Commons (2011)

Perhatikan Gambar 3.13, arah ibu jari menyatakan arah arus listrik (arahnya ke kanan), jari lainnya menyatakan arah medan magnet (arahnya masuk) dan arah telapak tangan adalah arah gayanya (arah ke atas). Gaya magnet ini merupakan dasar dari motor listrik.



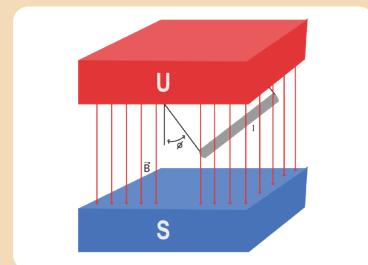
### Ayo Cek Pemahaman!

- Sebuah kawat 50 cm dihubungkan dengan sumber tegangan DC berada dalam medan magnet 0,06 T. Jika arus listrik yang mengalir pada rangkaian sebesar 0,05 A, tentukan besar dan arah gaya pada kawat YZ.



**Gambar 3.14 Kawat dalam medan Magnet**  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikburistek (2022)

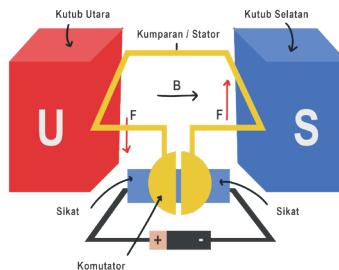
- Sebuah kawat horizontal digantung pada langit-langit ruangan dengan dua tali tak bermassa. Kawat tersebut memiliki panjang 0,20 m dan massa 0,08 kg. Sebuah medan magnet seragam besarnya 0,07 T diarahkan dari langit-langit ke lantai. Ketika arus  $i = 42$  A mengalir pada kawat, kawat berayun ke atas kemudian mencapai kesetimbangan membentuk sudut terhadap vertikal seperti ditunjukkan Gambar 3.15. Tentukan
  - sudut
  - tegangan masing-masing tali.



**Gambar 3.15 Ayunan magnetik**  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

## C. Motor Listrik

Motor listrik merupakan dasar dari semua alat elektronik yang berputar saat diberi arus listrik. Motor listrik terdiri dari magnet dan kumparan kawat yang akan berputar saat diberi arus listrik. Perhatikan Gambar 3.17, saat arus listrik mengalir pada kumparan timbul gaya  $F$  yang berpasangan pada kedua sisi kumparan.



Gambar 3. 16 Bagian-bagian motor listrik  
Sumber : Nanda Aulia Rahma/Kemendikburistek (2022)

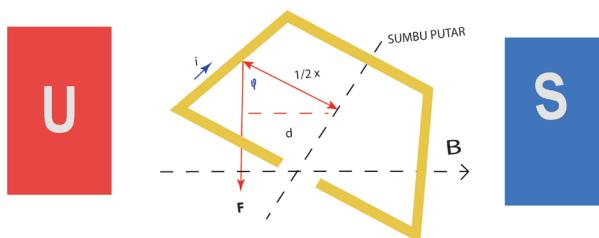
Putaran kumparan pada motor listrik dipengaruhi oleh medan magnet, arus listrik dan jumlah lilitan kumparan. Putaran ini disebabkan adanya **momen kopel** yang timbul karena dua **momen gaya** berlawanan pada kawat berarus listrik. Besar momen gaya pada masing-masing kawat selalu berubah karena besar lengan gaya selalu berubah akibat perubahan posisi kawat terhadap arah medan magnetnya meskipun besar gaya magnetnya tetap. Besar gaya magnet pada setiap sisi kawat dapat diturunkan dari persamaan:

$$F = iLB \sin 90^\circ$$

dengan  $L$  yaitu panjang sisi kiri atau sisi kanan dan sudut  $\theta = 90^\circ$  karena arah arus listrik pada kawat selalu tegak lurus terhadap medan magnet. Adapun besar momen gaya pada setiap sisi dapat ditentukan dengan persamaan:

$$\tau = F d$$

dengan  $d$  yaitu lengan gaya atau jarak tegak lurus antara poros rotasi dan titik tangkap gayanya. Coba perhatikan Gambar 3.17, yaitu penggambaran Gambar 3.16 pada arah atas loop, terlihat lengan gayanya adalah  $d = \frac{1}{2} x \sin \varphi$ .



Gambar 3. 17 Kumparan motor dari atas  
Sumber : Nanda Aulia Rahma/Kemendikburistek (2022)

Karena luas penampang kawat  $A = xL$ , maka momen gaya pada satu sisi sebesar:

$$\tau = iLB \frac{1}{2} x \sin \varphi = \frac{iAB}{2} \sin \varphi$$

Sehingga besar momen gaya total dari kedua sisi atau momen kopelnya:

$$\tau = iLB \sin \varphi \quad (3-7)$$

Momen kopel terbesar saat  $\varphi = 90^\circ$ , dan momen kopel terkecil saat  $\varphi = 0^\circ$ .



### Aktivitas 3.2. Ayo, Berpikir Kreatif!

Pada aktivitas ini, coba diskusikan bagaimana rancangan sebuah motor listrik. Tuliskan alat dan bahan yang dibutuhkan, disain alat dan langkah-langkah pembuatannya. Kemudian buat motor listrik sesuai rancangan dan uji coba. Buat laporan pembuatan produk dan hasilnya dipresentasikan.

## D. Medan Magnet Induksi

Teori kemagnetan dan kelistrikan dikembangkan secara terpisah sampai pada tahun 1820 Hans Christian Oersted (1777-1851) menemukan bahwa arus listrik mempengaruhi simpangan kompas. Oersted juga menyatakan bahwa kemagnetan berkaitan dengan kelistrikan. Tidak lama setelah itu, tahun 1827 Andre Marie Ampere (1775-1856) mengusulkan bahwa arus listrik adalah sumber dari fenomena magnetik.



### Aktivitas 3.3.

#### Tujuan

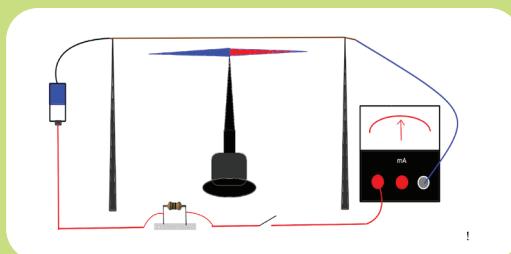
Menunjukkan medan magnet induksi pada kawat berarus listrik.

#### Alat dan Bahan

kawat tembaga, baterai 9V / catu daya, 3 resistor (10 Ohm, 22 Ohm, 33 Ohm) atau rheostat, ampere meter, penyangga, jarum kompas, saklar.

#### Kegiatan 1

Susun alat seperti gambar 3.18.



Gambar 3.18 Skema percobaan Oersted

Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Sebelum diberi arus listrik, pastikan kawat tembaga searah arah jarum kompas ke utara selatan. Hubungkan saklar listrik, dan lihat arus yang terukur oleh ampere meter, perhatikan berapa derajat besar simpangan kompas (jika sulit menentukan sudut simpangannya, cukup bandingkan secara kualitatif).

Coba ubah arah arus pada kawat dan perhatikan arah simpangan kawat. Diskusikan bagaimana pengaruh arus listrik terhadap simpangan kompas?

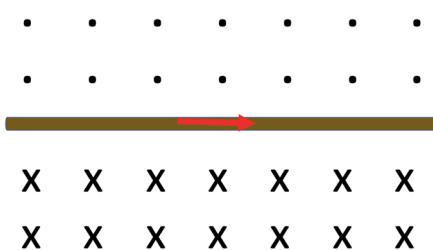
Alternatif lain, jika peralatan tidak tersedia jika dapat terkoneksi internet, maka lakukan pengamatan virtual pada tautan di bawah atau pindai kode QR.

[https://javalab.org/en/magnetic\\_field\\_around\\_a\\_wire\\_en/](https://javalab.org/en/magnetic_field_around_a_wire_en/)



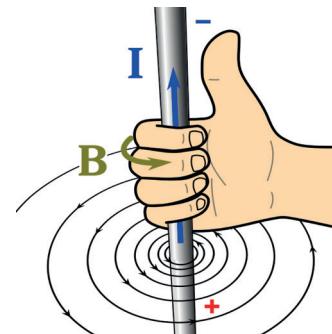
## 1. Medan Magnet di Sekitar Kawat Lurus

Kompas yang menyimpang saat diletakan dekat dengan kawat berarus listrik menunjukkan bahwa di sekitar kawat berarus listrik terdapat medan magnet, atau dikenal dengan medan magnet induksi. Arah medan magnet memenuhi aturan tangan kanan yaitu arah ibu jari menyatakan arah arus dan arah jari yang melingkar menyatakan arah medan magnetnya. Lihat Gambar 3.19.



Gambar 3.20 Arah medan magnet

Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



Gambar 3.19 Aturan tangan kanan medan magnet

Sumber : Mike Run / Wikimedia Commons (2020)

Jika arah medan digambarkan dalam dua dimensi, untuk kawat lurus panjang ke kanan seperti Gambar 3.20, maka arah medan magnet bagian atas keluar bidang kertas (digambarkan dengan titik) dan arah medan magnet bagian bawah kawat masuk bidang kertas (digambarkan dengan silang). Berdasarkan hasil

eksperimen ditemukan bahwa medan magnet sebanding dengan besar arus listrik dan berbanding terbalik dengan jaraknya.

Besar kuat medan magnet induksi ( $B$ ) kawat lurus yang sangat panjang, pada sebuah titik sebanding dengan arus listrik ( $i$ ) dan berbanding terbalik jaraknya ( $r$ ):

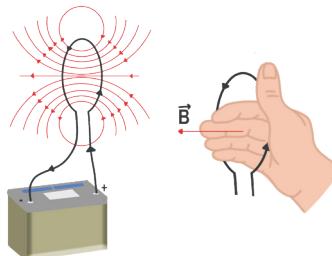
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (3-8)$$

dengan  $\mu_0$  adalah permeabilitas medium udara atau ruang hampa sebesar  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  mA<sup>-1</sup>.

## 2. Kawat Melingkar Berarus Listrik

Jika arus listrik mengalir pada kawat melingkar, medan magnet yang timbul terlihat pada Gambar 3.21. Di pusat lingkaran, arah medan magnet ditunjukkan dengan arah jari tangan sedangkan ibu jari menunjukkan arah arus pada kawat. Untuk besar medan magnet  $N$  lilitan kawat berarus listrik di pusat lingkaran dengan jari-jari  $R$  adalah:

$$B = N \frac{\mu_0 I}{2r} \quad (3-9)$$

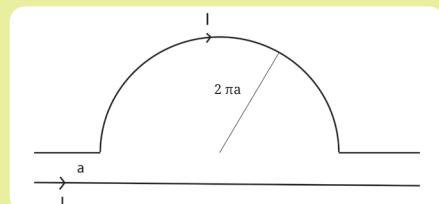


Gambar 3.21 Arah medan magnet kawat melingkar  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

Medan magnet merupakan besaran vektor, sehingga dalam menentukan resultan besar medan magnetnya Kalian harus menentukan arahnya dulu. Perhatikan contoh berikut.

### Contoh

Dua kawat seperti ditunjukkan Gambar 3.22 diberi arus listrik sama besar  $I$ . Jika jari-jari kawat setengah lingkaran  $2\pi a$  dan jarak antar kawat  $a$ , tentukan besar dan arah medan magnet induksi di titik pusat setengah lingkaran.



Gambar 3.22 Dua kawat berarus listrik  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

### Jawaban

Tentukan arah medan magnet induksi di titik pusat setengah lingkaran akibat dari arus yang mengalir dari kawat lurus ( $B_1$ ) dan dari arus yang mengalir dari kawat setengah lingkaran ( $B_2$ ). Arah  $B_1$  keluar bidang kertas (.), kita asumsikan arah positif. Arah  $B_2$  masuk bidang kertas (X), kita asumsikan arah negatif. Resultan medan magnet induksi:

$$\mathbf{B}_{tot} = \mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2$$

Gunakan persamaan medan magnet induksi untuk kawat lurus pada  $B_1$  dan medan magnet induksi pada kawat melingkar untuk  $B_2$ , tapi karena hanya setengah lingkaran kalikan dengan  $\frac{1}{2}$ .

$$B_{tot} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} - \frac{1}{2} \frac{\mu_0 I}{2r}, \text{ dengan } R \text{ yaitu jari-jari setengah lingkaran}$$

$$B_{tot} = \frac{4\pi 10^{-7}}{2\pi a} - \frac{1}{2} \left( \frac{4\pi 10^{-7}}{2 \cdot 2\pi a} \right) = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{a} - \frac{10^{-7}}{2a}$$

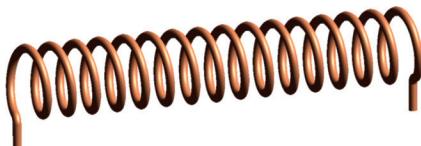
$$B_{tot} = \frac{410^{-7} \cdot 10^{-7}}{2a} = \frac{3}{2a} \cdot 10^{-7} \text{ Tesla}$$

Karena hasil  $B_{tot}$  positif, maka arahnya sama dengan  $B_1$  yaitu keluar bidang kertas.



#### Aktivitas 3.4

Buat sebuah solenoida menggunakan kawat konduktor, kemudian lakukan penyelidikan apa saja yang mempengaruhi medan magnet yang dihasilkan solenoida.



Gambar 3.23 Solenoida

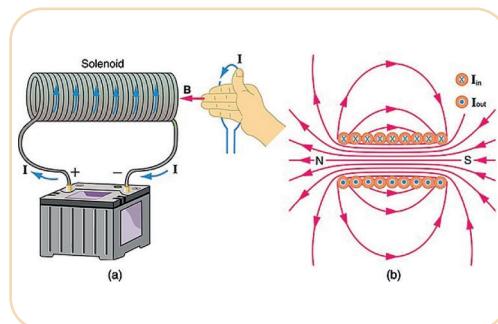
Sumber : Zureks /Wikimedia Commons (2008)

### 3. Solenoida

Solenoida merupakan lilitan kumparan kawat berbentuk heliks dengan panjang lebih besar dibandingkan diameternya. Medan magnet yang dihasilkan solenoida dapat dilihat pada Gambar 3.24.

Besar medan magnet di pusat solenoida dapat dinyatakan dengan:

$$B = \mu_0 nI \quad (3-10)$$



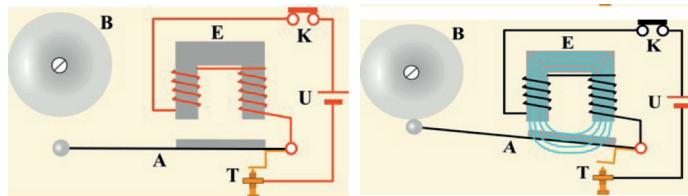
Gambar 3. 24 Medan magnet pada solenoida  
Sumber: OpenStax/Wikimedia Commons (2011)

dengan  $n$  yaitu jumlah lilitan ( $N$ ) tiap satuan panjang ( $l$ )

$$n = \frac{N}{l}$$

Inti besi biasanya dimasukan ke dalam lilitan solenoida untuk meningkatkan medan magnet yang dihasilkan solenoida. Inti besi memiliki permeabilitas

magnetik yang tinggi sehingga mudah termagnetisasi. Medan magnet yang dihasilkan inti besi saat berada dalam solenoida berarus listrik akan memperkuat medan magnet yang dihasilkan solenoid itu sendiri.



Gambar 3.25 Bel listrik

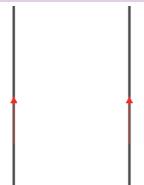
Sumber : IOK / Wikimedia Commons (2008)

Solenoida banyak digunakan pada produk teknologi. Salah satunya pada bel listrik. Saat arus listrik mengalir dalam rangkaian solenoida bel listrik, medan magnet dibangkitkan di sekitarnya. Medan magnet ini menyebabkan gaya tarik pada batang besi, menarik besi masuk ke dalam kumparan dan memukul belnya.



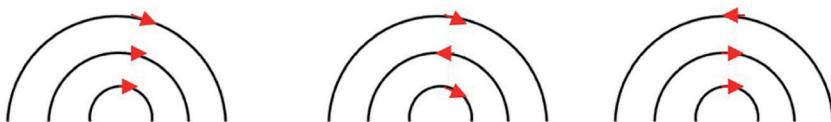
#### Ayo Cek Pemahaman

1. Dua kawat lurus panjang, satu sama lain berjarak **a** diberi aliran arus listrik seperti ditunjukkan pada gambar 3.26. Jika arus listrik pada masing-masing kawat  $I_1 = 2I_2$ , di manakah letak titik dengan kuat medan induksi nol?
2. Tiga sistem kawat setengah melingkar masing-masing tersusun secara konsentris. Arus yang mengalir pada setiap kawat sama besar dan arahnya ditunjukkan pada Gambar 3.27. Urutkan besar medan magnet induksi pada setiap pusat setengah lingkaran mulai dari yang terbesar!



Gambar 3.26 Kawat berarus listrik

Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



Gambar 3.27 Kawat Melingkar Berarus listrik

Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



#### Aktivitas 3.5. Literasi

##### Maglev

*Magnetic Levitation* adalah kereta yang diangkat secara magnetik. Kereta ini menggunakan gaya magnet induksi yang menyebabkannya dapat melayang di atas jalur pemandu



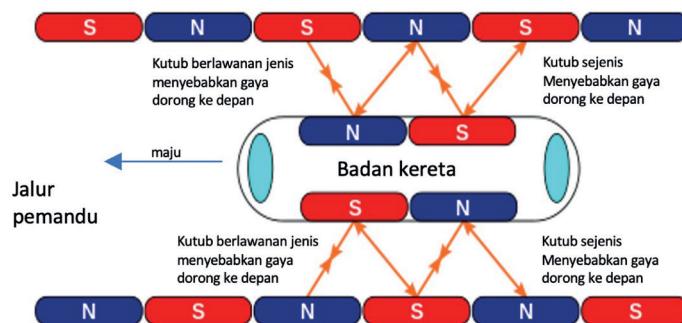
Gambar 3.28 Levitasi magnetik

Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

(guideway). Kereta naik beberapa sentimeter di atas jalur, sehingga terbebas dari gaya gesek saat bergerak.

Maglev tidak menggunakan rel biasa, tapi jalur pemandu yang diibaratkan memiliki solenoida sangat panjang. Medan magnet induksi dihasilkan pada jalur pemandu ketika arus dialirkkan. Sedangkan pada badan kereta sendiri dipasang elektromagnet yang kutub-kutubnya dapat diatur. Perhatikan Gambar 3.28, ketika kutub-kutubnya berlawanan maka timbul gaya tolak menolak yang menyebabkan badan kereta terangkat beberapa sentimeter sehingga tidak menyentuh jalur. Gaya magnet induksi ke arah atas ini seimbang dengan gaya berat kereta. Fenomena terangkatnya kereta dari jalur pemandu karena gaya magnet ini dikenal dengan istilah **levitasi magnetik**.

Badan kereta perlu ada gaya dorong ke depan, maka arah arus pada jalur pemandu dibuat sedemikian rupa sehingga kutub magnet yang dihasilkannya diatur seperti Gambar 3.29. Kutub magnet pada jalur pemandu yang berlawanan jenis berada di depan kereta sedangkan kutub sejenis berada di belakangnya.



Gambar 3.29 Arah gaya magnet medorong maglev maju

Sumber : Cool Cat / Wikimedia Commons (2005)

Akibat gaya dorong dari interaksi magnetik kutub-kutub sejenis dan berlawanan jenis ini, badan kereta dapat bergerak maju pada jalur pemandu. Pengaturan kutub sejenis dan tidak sejenis antara jalur pemandu dan badan kereta ini juga berfungsi untuk mengatur kecepatan kereta.

Maglev juga merupakan moda transportasi yang sangat murah dan efisien. Jalur pemandu dapat bertahan setidaknya selama 50 tahun dengan perawatan minimal karena tidak ada kontak mekanis dan keausan. Pada 480 kilometer per jam, Maglev mengkonsumsi 0,4 megajoule per penumpang per mil (1 mil = 1,60934 km) dibandingkan dengan 4 megajoule per penumpang per mil pada kecepatan 96 kilometer per jam pada kereta berkecepatan tinggi. Perbandingan energi per satuan luas persegi per kilometer Maglev transrapid dan kereta berkecepatan tinggi ICE 3 di Jerman dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Perbandingan Konsumsi Energi ICE3 dan Maglev

No	Laju (km/jam)	Konsumsi Energi Watt jam / km.m <sup>2</sup>	
		ICE 3	MaglevTransrapid
1.	150	24	27
2.	200	28	31
3.	250	33	35
4.	300	40	41
5.	330	46	45
6.	350	50	47
7.	400		56
8.	430		64

Sumber: stanford.edu (2010)

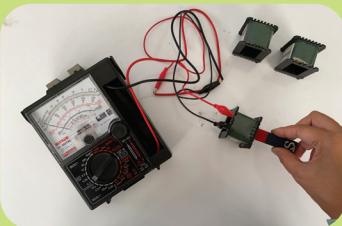
Jawab pertanyaan berikut :

- Buatlah kesimpulan mengenai konsumsi energi Maglev transrapid dibandingkan dengan kereta ICE3 berdasarkan data Tabel 3.1.
- Sebuah Maglev transrapid dengan kapasitas maksimum 200 penumpang bergerak pada kecepatan 480 km/jam menempuh jarak sejauh 300 mil. Jika elektromagnet dalam Maglev diibaratkan solenoida panjang dan tegangan listrik yang digunakan untuk menghasilkan gaya magnetnya yaitu 30 kV, tentukan :
  - konsumsi energinya
  - arus listrik yang mengalir pada rangkaian

## E. Gaya Gerak Listrik (GGL) Induksi

Pada sub-bab sebelumnya, kalian sudah mengetahui jika di sekitar kawat berarus listrik terdapat medan magnet induksi. Fenomena sebaliknya, ketika ada perubahan medan magnet akan menghasilkan **Gaya Gerak Listrik (GGL)**.


**Aktivitas 3.5**



**Gambar 3.30 Percobaan GGL induksi**  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Pada aktivitas ini Kalian akan menyelidiki bagaimana GGL dihasilkan pada kumparan akibat gerakan magnet.

Alat yang dibutuhkan yaitu 3 kumparan dengan jumlah lilitan yang berbeda, magnet batang 2 buah dengan kekuatan yang berbeda, dan galvanometer/multimeter.

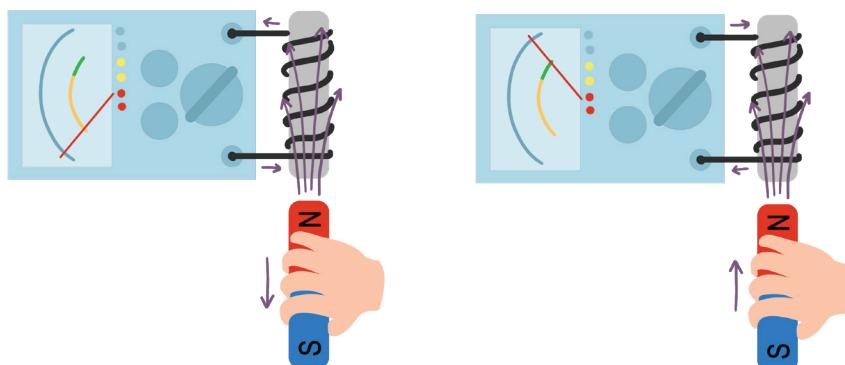
Susun alat seperti Gambar 3.30, kemudian coba diskusikan bagaimana syarat GGL induksi dihasilkan dan apa saja faktor-faktor yang menentukan besar GGL induksi.

Alternatif lain penyelidikan dapat melalui melalui simulasi virtual pada tautan atau pindai kode QR.



[https://phet.colorado.edu/  
sims/html/faradays-law/latest/  
faradays-law\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-law/latest/faradays-law_en.html)

Sebuah magnet batang jika digerakan ke dalam lilitan kumparan kawat yang dihubungkan dengan galvanometer, maka jarum galvanometer akan bergerak. Jarum galvanometer ini menunjukkan adanya arus listrik atau Gaya Gerak Listrik (GGL). GGL ini dihasilkan oleh perubahan **fluks magnetik induksi** dalam kumparan.

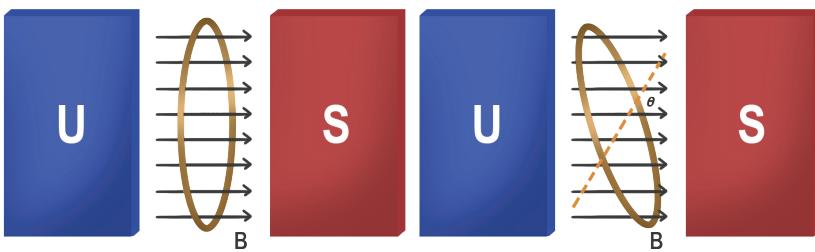


Gambar 3.31 Arah GGL induksi  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

Perhatikan Gambar 3.31. Saat kutub utara magnet digerakkan mendekati kumparan, arah arus listrik berbeda dengan saat kutub utara magnet digerakkan menjauhi kumparan. Fenomena ini dijelaskan dengan **Hukum Faraday** dan **Hukum Lenz**. Sebelum memahami keduanya, pahami terlebih dulu mengenai fluks magnet.

## 1. Fluks Magnet

Sebuah magnet memiliki medan magnet di sekitarnya. Perhatikan Gambar 3.32, jika ada sebuah kumparan berada dalam medan magnet, maka terdapat garis-garis medan magnet yang masuk ke dalam kumparan.



Gambar 3.32 Fluks magnet  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

Jumlah garis gaya magnet yang masuk dalam kumparan disebut **flux magnet**.

Secara umum, besar fluks magnet dapat dinyatakan:

$$\varphi = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

atau

$$\varphi = BA \cos \theta \quad (3-11)$$

Sudut  $\theta$  dalam hal ini adalah sudut yang dibentuk oleh garis gaya magnet dengan garis normal bidang. Perhatikan Gambar 3.32 a), sudut  $\theta$  pada Gambar tersebut adalah  $0^\circ$  sehingga persamaannya dapat dituliskan:

$$\varphi = BA \quad (3-12)$$

dengan  $\varphi$  adalah fluks magnet (Weber),  $B$  yaitu kuat medan magnet (Tesla) dan  $A$  adalah luas penampang ( $m^2$ ).

## 2. Besar GGL Induksi

Perhatikan kembali Gambar 3.31, saat magnet digerakkan mendekati atau menjauhi kumparan, terdapat perubahan fluks magnet yang masuk dalam kumparan. Akibat dari perubahan fluks ini mengakibatkan adanya perubahan fluks induksi. Adanya fluks induksi inilah yang menyebabkan adanya GGL induksi.

Besar GGL induksi dapat dinyatakan:

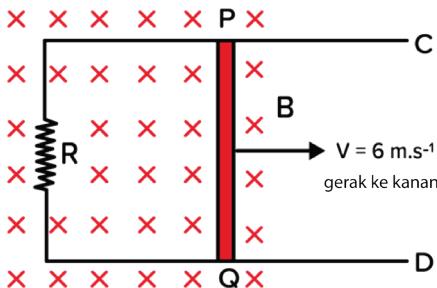
$$\varepsilon = -N \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} \quad (3-13)$$

dengan  $\varepsilon$  adalah GGL induksi (volt),  $\Delta \varphi$  adalah perubahan fluks (Weber),  $N$  adalah jumlah lilitan kumparan dan  $\Delta t$  adalah waktu.

Jika perubahan terjadi dalam waktu sesaat, maka persamaan dapat dinyatakan dalam persamaan turunan:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3-14)$$

Persamaan GGL induksi di atas dikenal dengan **Hukum Faraday**, yaitu GGL induksi dalam rangkaian sebanding dengan laju perubahan fluks magnetnya. Sedangkan tanda negatif pada persamaan dinyatakan oleh Hukum Lenz, yaitu bahwa fluks magnet induksi selalu berlawanan dengan perubahan fluks penyebabnya. Pada Gambar 3.31 a, saat magnet bergerak mendekati kumparan, jumlah fluks magnet dari kutub utara yang masuk ke dalam kumparan semakin meningkat. Oleh karena itu, timbul fluks magnet induksi yang berlawanan. Perubahan fluks magnet induksi inilah yang menghasilkan GGL induksi.



Gambar 3.33 kawat dalam medan magnet

Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Pada kasus rangkaian seperti Gambar 3.33, ketika logam dalam medan magnet digeser ke arah kanan, maka terdapat penambahan jumlah fluks magnet yang masuk ke dalam kumparan PQRS. Oleh karena itu, terjadi perubahan fluks induksi yang berlawanan dengan perubahan fluks tersebut.

Perubahan fluks ini menyebabkan ujung-ujung logam memiliki beda potensial. Ujung logam P menjadi positif dan ujung logam Q menjadi negatif artinya pada ujung-ujung logam terdapat GGL induksi. Hal ini terjadi karena muatan-muatan yang berada dalam logam memiliki kecepatan yang sama dengan kecepatan logam saat kawatnya digeser. Ketika muatan bergerak dalam medan magnet maka akan timbul gaya magnet pada muatan (Lihat pembahasan sub-bab sebelumnya). Muatan negatif akan bergerak ke arah bawah, sehingga ujung-ujung kawat PQ memiliki beda potensial (GGL induksi). Ketika kawat dihubungkan dengan resistor, arus akan mengalir dari P menuju resistor R kemudian ke Q dan kembali lagi ke P. Substitusikan persamaan fluks magnet, maka besar GGL induksi pada logam dapat dituliskan sebagai:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{\Delta(BA)}{\Delta t} = \frac{B\Delta(A)}{\Delta t} = \frac{B\Delta(Lx)}{\Delta t} = \frac{BL\Delta x}{\Delta t} = BLv$$

karena  $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ , maka

$$\varepsilon = BLv \quad (3-15)$$

dengan  $L$  = panjang logam (m),  $v$  = kecepatan gerak logam (m/s),  $B$  = besar medan magnet (Tesla) dan  $\varepsilon$  = GGL induksi (volt).

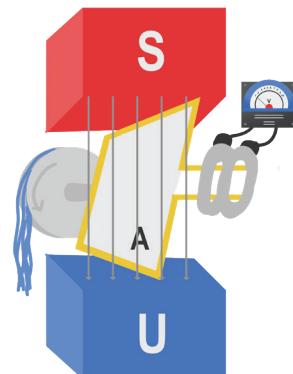
Logam jika dihubungkan dengan hambatan resistor  $R$  membentuk rangkaian tertutup, maka arus  $I$  yang mengalir pada rangkaian

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{BLv}{R} \quad (3-16)$$

## F. Generator

Kalian sudah memahami bagaimana GGL induksi dihasilkan. Konsep ini merupakan dasar dari pengembangan generator sebagai sumber tegangan listrik. Generator pada dasarnya terdiri dari magnet dan kumparan.

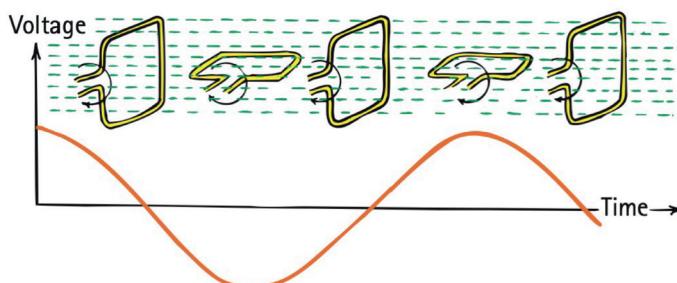
Kumparan diputar untuk menghasilkan GGL dengan menggunakan berbagai energi baik air, angin, panas bumi, bahkan energi yang berasal dari pembakaran batu bara. Generator mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.



Gambar 3.34 Generator

Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistik (2022)

Saat kumparan dalam medan magnet berputar, terjadi perubahan fluks magnetik dalam kumparan. Akibat perubahan fluks dalam kumparan menghasilkan GGL induksi dan pada rangkaian tertutup menghasilkan arus listrik. Grafik GGL yang terukur saat kumparan digerakkan dalam medan magnet terlihat pada Gambar 3.35.



Gambar 3.35. Grafik GGL yang dihasilkan generator

sumber: Paul G. Hewitt/Conceptual Physics (2014)

Substitusikan persamaan GGL induksi, maka besar GGL pada generator dapat dituliskan menjadi:

$$\varepsilon = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{Nd(BA \cos \theta)}{dt}$$

Karena medan magnet B dan luas penampang kumparan A selalu tetap sedangkan putaran kumparan mengakibatkan perubahan sudut yang terus menerus, maka persamaan dituliskan

$$\varepsilon = \frac{NBAd(\cos \theta)}{dt}$$

Sudut  $\theta$  yaitu sudut putaran kumparan yang dapat dinyatakan dalam laju angularnya,  $\theta = \omega t$  sehingga persamaan GGL-nya:

$$\varepsilon = \frac{NBA d (\cos \omega t)}{dt} = NBA \omega \sin \omega t \quad (3-17)$$

Persamaan 3-17 sesuai dengan grafik Gambar 3.36, yaitu berupa fungsi sinusoidal. Adapun GGL maksimum yang dihasilkan

$$\varepsilon = NBA\omega \quad (3-18)$$

Dengan  $N$  yaitu jumlah lilitan kumparan,  $B$  yaitu besar kuat medan magnet (Tesla),  $A$  yaitu luas penampang loop kumparan ( $m^2$ ) dan  $\omega$  yaitu laju sudut putaran (rad/s). Laju sudut putaran dapat dinyatakan,

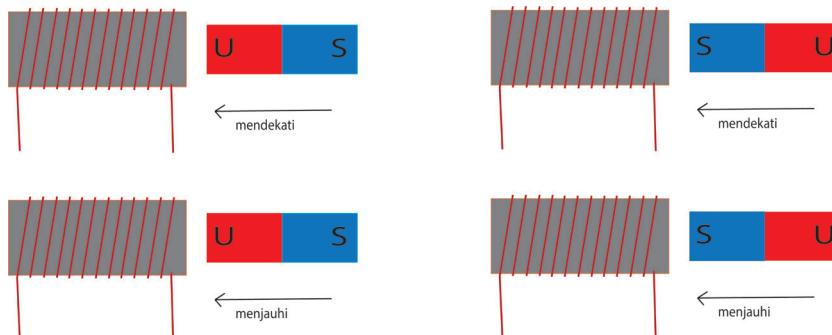
$$\omega = 2\pi f$$

dengan  $f$  adalah frekuensi putaran (Hz).



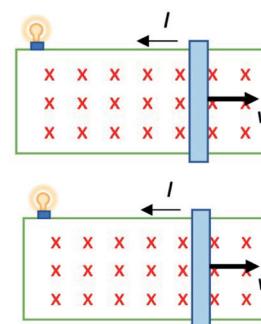
### Ayo Cek Pemahaman

1. Sebuah magnet dan kumparan yang diberi inti besi terlihat pada Gambar 3.36. Ketika magnet bergerak mendekati dan menjauhi kumparan dengan kutub yang berbeda, gambarkan arah arus induksi pada masing-masing kumparan.



Gambar 3.36. Inti besi dalam solenoida  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

2. Dua lampu A dan B memiliki hambatan  $16 \Omega$  dan  $9 \Omega$ , masing-masing akan dihubungkan dengan rangkaian konduktor dalam medan magnet  $B$  dengan arah masuk bidang kertas seperti Gambar 3.36.



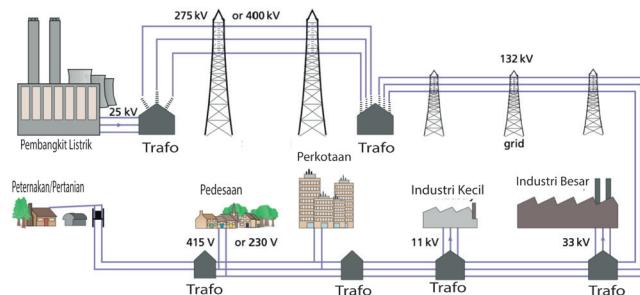
Gambar 3.36 Batang konduktor bergerak  
Sumber: Jhon D.Cutnell/Physics 9ed (2012)

Agar kedua nyala lampu memiliki daya yang sama, tentukan perbandingan laju batang konduktor.

## G. Induktansi dan Transformator

Transformator atau trafo merupakan alat yang sangat penting dalam sistem transmisi energi listrik dari pembangkit listrik sampai siap digunakan di rumah-rumah. Pada sistem transmisi, trafo step up digunakan untuk menaikkan tegangan dari pembangkit listrik agar dapat dialirkan dalam jarak jauh tanpa kehilangan daya yang besar.

Tegangan dari pembangkit listrik 6-25 kV dinaikkan menjadi 70 – 150 kV untuk tegangan tinggi dan 500 kV untuk tegangan ekstra tinggi (TET). Setelah sampai titik distribusi, tegangan diturunkan kembali menggunakan trafo step down menjadi 20 kV sehingga siap digunakan oleh bidang industri, kemudian menjadi 230 V sehingga siap digunakan pada skala rumah tangga.

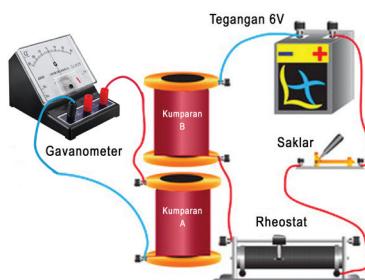


Gambar 3.38. Sistem transmisi listrik

sumber: Tom Duncan/Physics (2014)

### 1. Induktansi

Pada dasarnya, prinsip kerja trafo berkaitan dengan induksi elektromagnetik. Perhatikan Gambar 3.39, saat saklar dihubungkan, terjadi perubahan arus listrik dalam kumparan pertama sehingga terjadi perubahan fluks magnet dalam waktu sesaat.



Gambar 3. 39 Induksi bersama

Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistik (2022)

Garis magnet ini juga mempengaruhi kumparan kedua sehingga pada kumparan kedua juga terjadi perubahan fluks magnet dalam waktu singkat. Meskipun tidak ada kabel penghubung dari kumparan pertama ke kumparan kedua, namun karena terdapat perubahan fluks magnet, pada kumparan kedua juga timbul GGL induksi pada waktu

sesaat, yaitu saat sakelar dihubungkan. Namun setelah sakelar terhubung dan arus listriknya konstan, GGL kembali nol. Efek ini dikenal dengan **induksi bersama** (*mutual induction*). Besaran yang berkaitan dengan induksi bersama dikenal dengan **induktansi bersama**,

$$M = \frac{N_2 \varphi_{21}}{I_1} \quad (3-18)$$

dengan  $M$  = induktansi bersama (Henry),  $N_2$  = jumlah lilitan kumparan kedua,  $I_1$  = arus listrik kumparan pertama,  $\varphi_{21}$  = jumlah fluks (Weber).

Besar GGL pada kumparan kedua akibat dari perubahan arus pada kumparan pertama yaitu:

$$\varepsilon = -M \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (3-19)$$

dengan  $\varepsilon$  = GGL induksi (volt),  $M$  = induktansi bersama (Henry), dan  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  = laju perubahan arus pada kumparan (A/s). Perubahan arus ini selain terjadi pada saat rangkaian dihidupkan atau diputuskan aliran listriknya, juga terjadi karena aliran arusnya berupa arus bolak balik (AC). Arus AC akan dibahas pada Bab 4.

Konsep induktansi berlaku juga pada satu kumparan, ketika arus listrik mengalir dalam kumparan akan menghasilkan fluks magnet. Besar fluks magnet induksi sebanding dengan arus listriknya, oleh karena itu didefinisikan besaran induktansi diri ( $L$ ). Persamaan  $L$  dinyatakan:

$$L = \frac{N\varphi}{I} \quad (3-20)$$

dengan  $L$  = induktansi diri (Henry),  $\varphi$  = jumlah fluks (Weber),  $I$  = arus listrik (Ampere).

Perubahan arus listrik dalam kumparan menyebabkan perubahan fluks magnet sehingga menyebabkan adanya GGL induksi pada kumparan. Besar GGL induksi dalam kumparan dapat dinyatakan:

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (3-21)$$

dengan  $\varepsilon$  = GGL induksi (volt),  $L$  = induktansi diri (Henry),  $\frac{\Delta I}{\Delta t}$  = laju perubahan arus pada kumparan (A/s).

## 2. Transformatör

Ada dua jenis transformator atau trafo yang digunakan dalam sistem kelistrikan yaitu trafo *step up* yang berfungsi untuk menaikkan tegangan dan trafo *step down* yang berfungsi menurunkan tegangan. Dengan memahami GGL induksi  $\varepsilon$  sebanding dengan jumlah lilitan kumparan  $N$ , untuk menaikkan atau menurunkan tegangan dapat dilakukan dengan cara mengubah jumlah lilitan kumparan.



Gambar 3.40 Jenis trafo  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

Pada trafo *step down*, jumlah lilitan primer ( $N_p$ ) lebih besar dari jumlah lilitan sekunder ( $N_s$ ), sedangkan pada trafo *step up* sebaliknya. Perbandingan GGL induksi pada kumparan primer  $\varepsilon_p$  dan sekunder  $\varepsilon_s$  dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

Persamaan pada trafo umum dituliskan sebagai:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (3-22)$$

dengan  $V_p$  adalah tegangan primer atau tegangan input (Volt),  $V_s$  adalah tegangan sekunder atau tegangan output (Volt),  $N_p$  adalah jumlah lilitan primer, dan  $N_s$  adalah jumlah lilitan sekunder.

Pada saat arus listrik mengalir dalam rangkaian, sebagian energi diubah menjadi panas disebut **daya disipasi** (Ingat kembali pembahasan Bab 1). Oleh karena itu, trafo pada umumnya tidak memiliki efisiensi 100%. Sama dengan nilai efisiensi pada mekanika dan termodinamika bahwa efisiensi merupakan perbandingan daya primer atau daya input dengan daya sekunder atau daya output, maka

efisiensi trafo, yaitu:

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \times 100\% = \frac{V_s I_s}{V_p I_s} \times 100\%$$



### Aktivitas 3.7

#### Tujuan

Menyelidiki prinsip kerja trafo.

#### Alat dan bahan

- trafo *step down*
- catu daya
- multimeter
- kabel penghubung.



Gambar 3.41. Eksperimen trafo  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

### Langkah kegiatan:

1. Rangkai trafo dan catu daya pada mode tegangan AC sebagai sumber tegangan input ( $V_{in}$ ) sebesar 12 V, kemudian pasang kabel pada masing-masing pin tegangan keluaran dan hubungkan dengan multimeter.
2. Ukur tegangan input ( $V_{in}$ ) dan tegangan output ( $V_{out}$ ) trafo
3. Ubah tegangan catu daya, lakukan kembali Langkah 2.
4. Tuliskan data pengamatan dalam bentuk tabel.
5. Diskusikan kesimpulan data tabel pengamatan dan tuliskan.
6. Diskusikan apakah efisiensi trafo tersebut dapat ditentukan dan berapa hasilnya?



### Ayo Cek Pemahaman

1. Induksi bersama merupakan prinsip dasar detektor logam. Alat ini menggunakan dua kumparan besar yang sejajar satu sama lain dan memiliki sumbu yang sama. Karena induksi bersama, generator AC yang terhubung ke kumparan primer menyebabkan GGL induksi pada kumparan sekunder sebesar 0,46 V. Ketika kumparan melewati logam, induktansi bersama meningkat. Perubahan GGL memicu alarm berbunyi. Jika induktansi bersama meningkat tiga kalinya, tentukan GGL induksinya sekarang.
2. Sebuah stasiun pembangkit listrik menghasilkan daya  $1,2 \times 10^6$  W yang akan dikirimkan ke sebuah kota berjarak 7,0 km menggunakan **dua kabel** transmisi. Masing-masing kabel transmisi memiliki hambatan  $5,0 \times 10^2 \Omega/\text{km}$ .
  - a. Tentukan daya disipasinya jika daya ditransmisikan pada tegangan 1200 V.
  - b. Jika trafo *step-up* 100:1 digunakan untuk menaikkan tegangan sebelum daya ditransmisikan. Berapa daya disipasinya sekarang?



### Proyek

Pada kegiatan proyek Bab 3 ini, diskusikan bersama teman sekelompok untuk merancang dan membuat produk terkait medan magnet induksi atau GGL induksi. Produk yang dibuat diharapkan dapat menjadi alternatif penyelesaian masalah yang terjadi di lingkungan sekitar. Sebagai inspirasi proyek, Kalian dapat memilih beberapa tema berikut

1. Merancang dan membuat prototipe pembangkit listrik alternatif dengan energi terbarukan seperti tenaga mikrohidro dan angin.
2. Merancang dan membuat produk pemanfaatan motor listrik / dinamo dalam kehidupan sehari-hari seperti alat penyapu rumah otomatis (*sweeping machine*).
3. Merancang dan membuat mobil listrik mainan menggunakan solenoida (*solenoid engine*).

Kalian boleh membuat produk inovasi lainnya dengan tetap menunjukkan penggunaan konsep medan magnet induksi atau elektromagnetik. Buat laporan produk berupa karya tulis ilmiah.

### Rangkuman

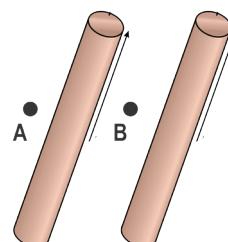
1. Medan magnet adalah daerah di sekitar magnet ketika magnet atau muatan yang bergerak akan mengalami gaya.
2. Besar gaya magnet pada muatan yang bergerak dalam medan magnet secara tegak lurus,  $F = qvB$
3. Gaya magnet akan timbul pada kawat berarus listrik ketika kawat tersebut membentuk sudut terhadap medan magnet.
4. Besar gaya magnet pada kawat lurus berarus listrik dalam medan magnet secara tegak lurus,  $F = iLB$
5. Besar medan magnet induksi di sekitar kawat lurus panjang berarus listrik,  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$
6. Besar medan magnet induksi di pusat melingkar berarus listrik,
$$B = N \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$
7. Besar medan magnet induksi di pusat solenoida berarus listrik,
$$B = \frac{\mu_0 N I}{L}$$
8. Lintasan gerak muatan dengan kecepatan konstan pada bidang tegak lurus terhadap medan magnet homogen berupa lingkaran.
9. Perubahan fluks magnet dalam kumparan menyebabkan adanya GGL induksi yang disebabkan fluks induksi.
10. Hukum Lenz menyatakan bahwa arah fluks induksi selalu berlawanan dengan fluks penyebabnya.
11. Besar GGL induksi,  $\varepsilon = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$

12. Besar induktansi diri ( $L$ ),  $L = \frac{N\phi}{I}$
13. Induktansi solenoida dapat ditingkatkan dengan menambahkan inti besi ke dalam solenoida.
14. Persamaan pada trafo,  $\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$

### Asesmen

Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan tepat.

- Dua kawat lurus panjang terpisah pada jarak 0,1 m satu sama lain. Pada masing-masing kawat mengalir arus listrik sebesar 8 A pada arah berlawanan. Tentukan besar medan magnet pada titik A (0,05 m dari kawat 1) dan B (titik tengah antara kawat 1 dan 1) yang sejajar dengan kedua kawat seperti terlihat pada Gambar 3.42.

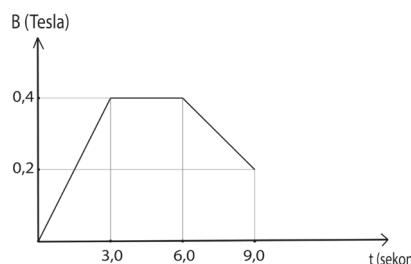


Gambar 3.42 Dua kawat sejajar  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

- Sebuah medan magnet melewati loop kawat stasioner, dan besarnya berubah terhadap waktu sesuai dengan grafik pada gambar dengan arah medan konstan.

Ada tiga interval waktu yang ditunjukkan dalam grafik : 0–3,0 detik, 3,0–6,0 detik, dan 6,0–9,0 detik. Loop terdiri dari 100 lilitan kawat dan memiliki luas  $0,15 \text{ m}^2$ . Medan magnet diorientasikan sejajar dengan garis normal loop.

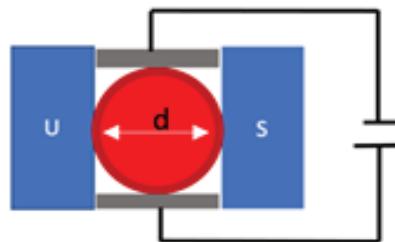
- Pada interval manakah GGL induksi dihasilkan?
  - Tentukan GGL induksi untuk setiap interval.
  - Tentukan arus induksi untuk interval pertama dan ketiga jika kawat memiliki hambatan  $0,50 \Omega$ .
- Perhatikan pernyataan di bawah ini, kemudian beri tanda ceklis (✓) pada kolom benar jika pernyataan tersebut benar dan beri tanda ceklis (✗) pada kolom salah jika pernyataan tersebut salah.



Gambar 3.43 Grafik medan induksi  
Sumber : Jhon D. Cutnell / Physics 9ed (2012)

Pernyataan	Benar	Salah
GGL induksi timbul pada kumparan jika magnet berada di dalam kumparan		
Semakin cepat gerak magnet keluar / masuk kumparan, GGL induksi semakin besar		
Arah fluks induksi selalu berlawanan dengan arah fluks penyebab		
GGL induksi pada kumparan tidak dipengaruhi jumlah lilitan kumparan		

4. Laju aliran darah dalam pembuluh darah dapat diukur dengan menggunakan alat seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.44. Jika pembuluh darah berdiameter 5mm, besar medan magnet yang digunakan 0,08 T sedangkan tegangan yang terukur pada voltmeter adalah 0,1 mV. Tentukan laju aliran darah dalam pembuluh.



Gambar 3.44 Alat ukur laju aliran darah

Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

5. Sebuah transformator terdiri dari dua kumparan yang dililitkan pada inti besi dihubungkan ke generator dan resistor. Jika kumparan primer terdiri dari 100 lilitan dan kumparan sekunder terdiri dari 180 lilitan sedangkan tegangan maksimum pada resistor adalah 67 V. Tentukan GGL maksimum generator.

## Pengayaan

### MRI (*Magnetic Resonance Imaging*)

Magnetic resonance imaging (MRI) adalah salah satu alat pencitraan medis yang sangat bermanfaat dan berkembang pesat. MRI menghasilkan gambar tubuh dua dimensi dan tiga dimensi yang memberikan informasi medis penting tanpa bahaya sinar X. Gambar MRI sangat rinci dan informatif tentang struktur dan fungsi organ sehingga digunakan untuk mengetahui



Gambar 3.45 MRI

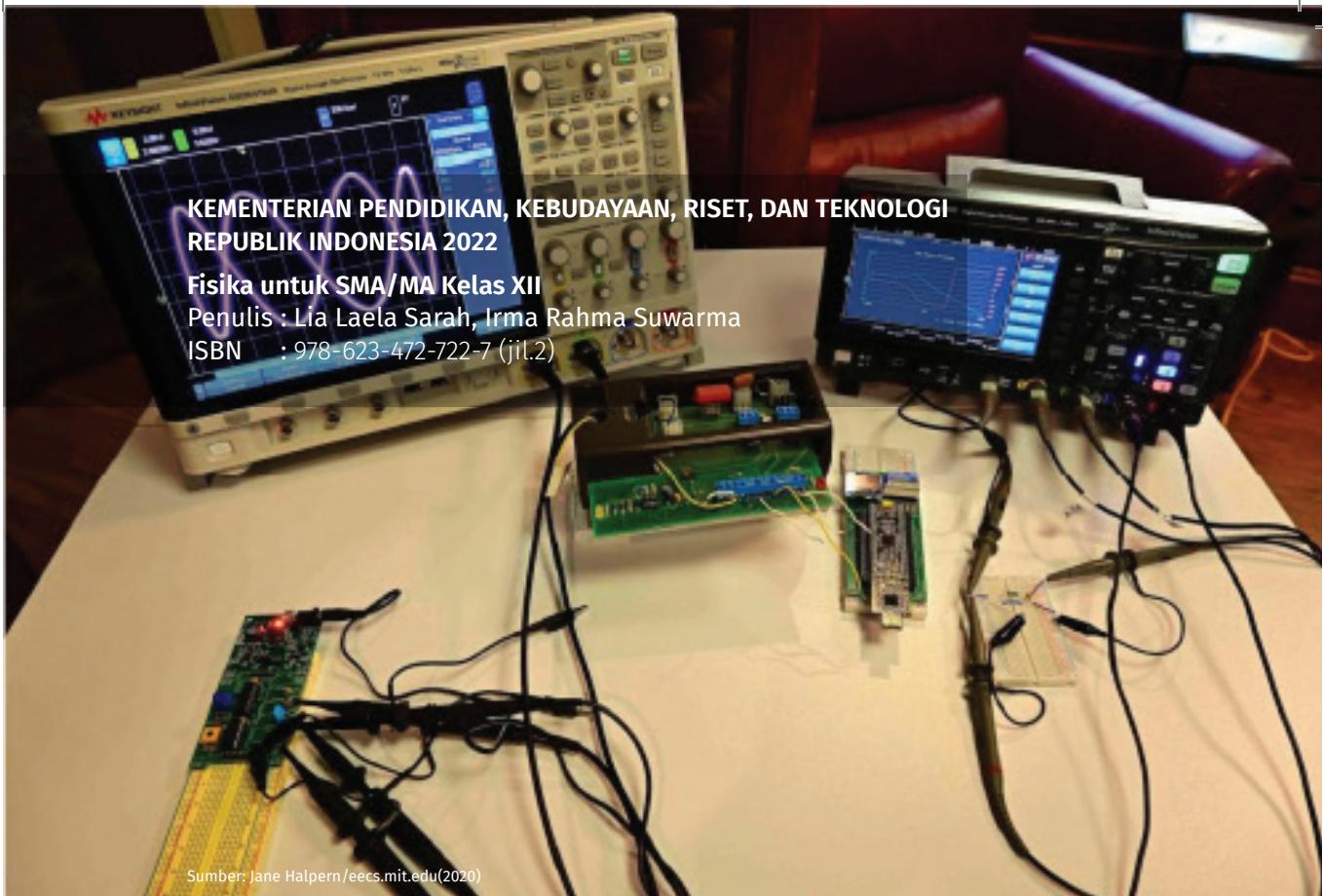
sumber: Westmead Hospital, CSIRO/Wikimedia Commons (2006)

penyakit tumor, stroke, cedera bahu, infeksi dan sebagainya. Pada prinsipnya, MRI didasarkan pada efek resonansi magnetik nuklir. Bagian terbesar dari alat ini adalah magnet superkonduktor yang menciptakan medan magnet antara 1 dan 2 T. Magnet yang dihasilkan ini memberikan interaksi pada atom-atom dalam tubuh. Buatlah sebuah artikel mengenai prinsip kerja MRI secara rinci.

### Refleksi

Setelah alian mempelajari Bab 3 Kemagnetan:

1. Materi apa yang menarik menurut Kalian?
2. Bagaimana manfaat medan magnetik induksi dalam kehidupan sehari-hari?
3. Apakah Kalian sudah memahami konsep-konsep yang ada pada Bab 3 ini?
4. Apa yang ingin Kalian kembangkan terkait pemanfaatan induksi magnetik dalam kehidupan sehari-hari?



# BAB 4

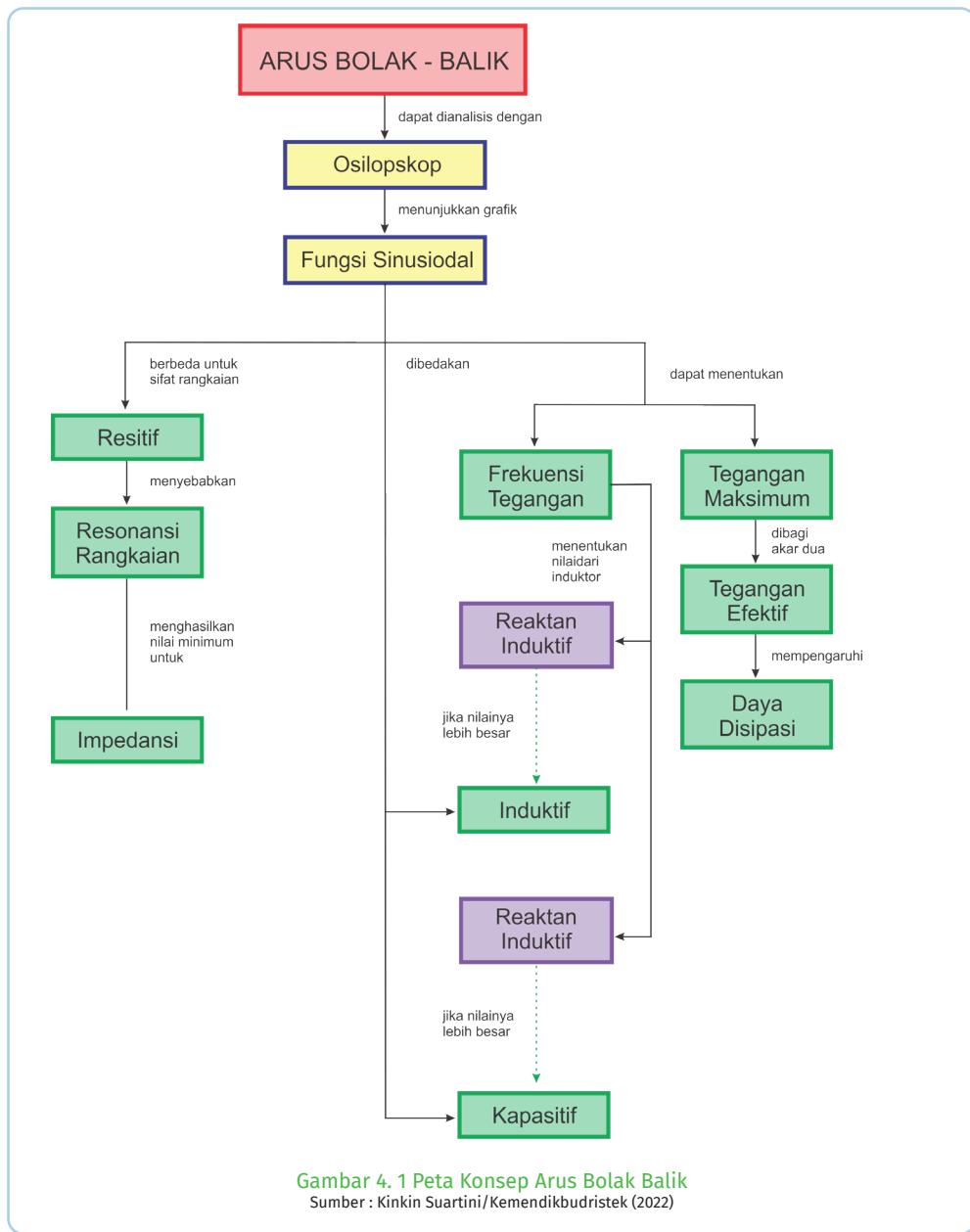
## ARUS BOLAK-BALIK

### Kata Kunci

Tegangan maksimum • Tegangan efektif • Reaktansi • Impedansi • Daya disipasi

#### Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, kalian dapat menerapkan konsep arus bolak-balik dan mengidentifikasi karakteristik rangkaian arus bolak-balik.



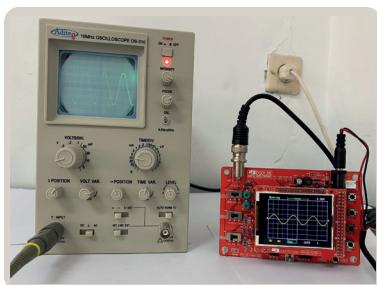
Arus bolak balik saat ini merupakan jenis kelistrikan yang paling banyak digunakan di rumah-rumah. Sumber arus listrik sebagai kebutuhan primer masyarakat, dihasilkan secara masal dan diatur distribusinya oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN). Arus listrik bolak balik (*Alternating Current / AC*) yang berasal dari PLN ini memiliki frekuensi 50 Hz dengan tegangan efektif sekitar 220 V.

Pada arus bolak balik polaritas kutub positif negatifnya selalu berubah secara sinusoidal. Hal ini, berbeda dengan sumber arus searah yang akan selalu mengalir serarah, yaitu dari kutub positif ke kutub negatif. Mengapa hal ini dapat terjadi? Kalian dapat membaca kembali konsep generator.

## A. Persamaan Arus Bolak Balik

Pada Bab 3, sudah dibahas bagaimana tegangan bolak balik ini dihasilkan oleh generator. GGL atau tegangan yang dihasilkan memiliki grafik berupa sinusoidal, lihat persamaan (3- 17). Pada arus bolak balik, persamaan tegangan dapat dituliskan sebagai:

$$V = V_{max} \sin\omega t \quad (4-1)$$



Gambar 4.2 Osiloskop  
a) CRO OS 310 b) DSO Mini 0138  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

dengan  $V_{max}$  adalah tegangan maksimumnya. **Tegangan maksimum** dapat diketahui menggunakan alat yang menampilkan grafik tegangan sebagai fungsi waktu. Alat yang biasa digunakan untuk melihat grafik ini disebut osiloskop.

Osiloskop banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Misalnya di bidang otomotif, osiloskop digunakan

untuk mendeteksi kerusakan mobil berdasarkan analisis sinyal listriknya. Sedangkan dalam bidang kedokteran, osiloskop digunakan untuk menganalisis gelombang otak pada pasien.



**Ayo, Bernalar Kritis!**

Berdasarkan pemaparan di atas, coba ajukan sebuah pertanyaan terkait penggunaan arus bolak balik dan osiloskop.

Sebelum mempelajari lebih lanjut bagaimana karakteristik rangkaian arus bolak balik, perhatikan terlebih dulu bagaimana cara menggunakan osiloskop melalui tautan atau pindai kode QR, kemudian cermati membaca grafik osiloskop berikut ini.

<https://www.youtube.com/watch?v=bm9sDtKmCOY>



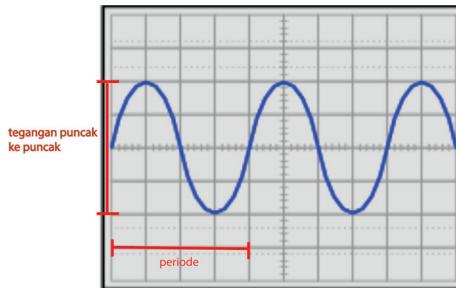


Ayo, Cermati!

## Cara Membaca Osiloskop

Gelombang yang terlihat pada layar osiloskop dibaca dua arah, yaitu vertikal dan horizontal. Arah vertical, yang dibaca adalah besar tegangan. Sedangkan pada arah horizontal yang dibaca periode atau frekuensi.

Misalnya, pada layar terlihat sinyal listrik seperti Gambar 4.3 dan pengaturan ke arah vertikal 2 volt/div serta pengaturan ke arah horizontal 20 ms/div.



Gambar 4.3 Membaca osiloskop  
Sumber: MIT/mathlets (2022)

Berdasarkan Gambar 4.3, grafik ke arah vertikal, dari puncak ke puncak ada 4 kotak (4 div), maka **tegangan puncak ke puncak ( $V_{pp}$ )** yaitu :

$$V_{pp} = 4 \text{ div} \times 2 \text{ Volt/div} = 8 \text{ Volt}$$

atau tegangan maksimumnya diukur dari garis tengah ke puncak sebesar 2 kotak (2 div), sehingga tegangan maksimumnya yaitu :

$$V_{maks} = 2 \text{ div} \times 2 \text{ volt/div} = 4 \text{ Volt}$$

atau  $V_{maks} = 1/2 V_{pp} = 4 \text{ volt.}$

Sedangkan ke arah horizontal, Kalian perhatikan untuk satu gelombang ada 4 kotak (10 kotak untuk 2,5 gelombang) atau 4 div, sehingga periodenya :

$$T = 4 \text{ div} \times 20 \text{ m/div} = 80 \text{ ms (milisekon)}$$

Besar frekuensinya =

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{80 \cdot 10^{-3}} = \frac{1}{8 \cdot 10^{-2}} = \frac{100}{8} = 12,5 \text{ Hz}$$

Selain menggunakan osiloskop, pengukuran tegangan juga dapat dilakukan menggunakan voltmeter. Jika mengukur tegangan bolak-balik menggunakan voltmeter, maka akan diperoleh satu nilai terukur. Nilai yang diukur oleh voltmeter ini disebut dengan **tegangan efektif atau root mean square ( $V_{rms}$  atau  $V_e$ )**.



## Aktivitas 4.1

### Tujuan

Mengetahui hubungan antara tegangan maksimum dan tegangan efektif.

### Alat dan Bahan

- multimeter
- osiloskop
- catu daya.

### Langkah kegiatan

1. Rangkai catu daya dan osiloskop, dan hidupkan osiloskop.
2. Kalibrasi terlebih dulu osiloskop dengan cara menekan tombol *Default Setup*. Hubungkan kabel pada digital osiloskop ke tempat kalibrasinya, lalu tekan tombol Auto sebanyak dua kali. Biarkan sejenak sampai tegangan yang terbaca pada osiloskop sebesar 3 V. Setelah berhasil lepaskan kabel dari tempat kalibrasinya.
3. Hubungkan kabel osiloskop dengan ujung-ujung catu daya.
4. Nyalakan catu daya pada mode AC dan berikan tegangan 6 V pada rangkaian. Perhatikan grafik yang ditampilkan oleh osiloskop, tentukan nilai tegangan maksimumnya, catat dalam tabel.
5. Ukur tegangan efektif catu daya ( $V_{ef}$ ) menggunakan voltmeter,kemudian catat dalam tabel.
6. Ubah tegangan catu daya menjadi 12V, 9V dan 3V kemudian lakukan Langkah 6 dan 7
7. Buat kesimpulan masing-masing tabel pengamatan mengenai hubungan tegangan maksimum ( $V_{maks}$ ) dan tegangan efektif ( $V_{ef}$ ).



Gambar 4. 4 Rangkaian eksperimen osiloskop

Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



Gambar 4. 5 Rangkaian osiloskop mini DSO

Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Jika osiloskop CRO tidak ada, sebagai alternatif, dapat digunakan osiloskop mini DSO seperti Gambar 4.5.

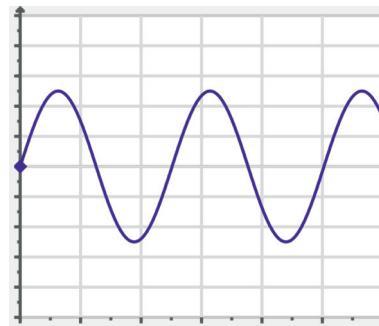
Pada tegangan bolak-balik, persamaan tegangan dapat dinyatakan dengan:

$$V = V_{maks} \sin \omega t$$

atau:

$$V = V_{maks} \sin 2\pi ft,$$

Grafiknya terlihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik tegangan bolak-balik

Sumber : MIT/mathlets (2022)

Hubungan antara tegangan maksimum dan tegangan efektif yaitu:

$$V_{maks} = V_{ef} \sqrt{2} \quad (4-2)$$

sedangkan hubungan tegangan maksimum ( $V_{maks}$ ) dengan tegangan puncak ke puncak ( $V_{pp}$ ) sebesar:

$$V_{pp} = 2 V_{maks} \quad (4-3)$$

Demikian juga dengan arus bolak-balik, arus bolak-balik dapat dinyatakan sebagai:

$$I = I_{maks} \sin \omega t \quad (4-4)$$

dengan  $I_{maks}$  yaitu tegangan maksimumnya. Sedangkan arus efektifnya  $I_{ef}$  yaitu

$$I_{ef} = \frac{I_{maks}}{\sqrt{2}} \quad (4-5)$$

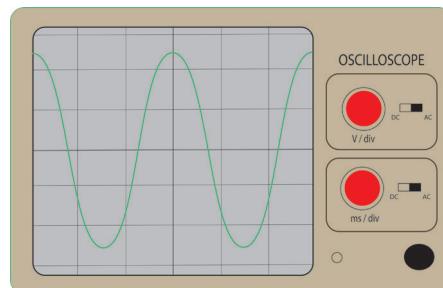


#### Ayo, Cek Pemahaman

Seorang siswa melakukan pengukuran tegangan arus bolak-balik menggunakan osiloskop. Kontrol sensitivitas vertikal diatur ke 0,5 volt/div, dan kontrol timebase ke arah horizontal diatur ke 2,5 ms/div.

Berdasarkan Gambar 4.7, tentukan:

- tegangan maksimum,
- tegangan puncak ke puncak,
- tegangan efektif
- frekuensi.



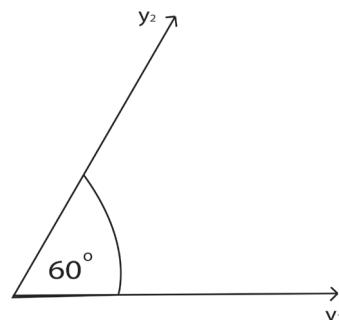
Gambar 4.7 Pembacaan osiloskop

Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Saat komponen elektronik seperti resistor, induktor dan kapasitor dihubungkan dengan sumber tegangan AC, masing-masing memiliki karakteristik tersendiri. Misal untuk kapasitor, saat dihubungkan dengan tegangan DC. Kapasitor akan mengisi muatan sampai penuh kemudian arusnya terputus. Jika kapasitor dihubungkan dengan tegangan AC, maka arus listrik akan mengalir pada kapasitor seperti halnya resistor.

Karakteristik masing-masing komponen digambarkan berupa grafik sinusoidal antara tegangan terhadap arus listriknya (V-I). Cara untuk memudahkan perhitungan matematis baik penjumlahan perkalian maupun pembagiannya, fungsi sinusoidal dinyatakan dalam bentuk diagram fasor (fase vektor). Diagram fasor adalah diagram yang menampilkan variabel fungsi sinusoidal dalam bentuk vektor.

Misal jika terdapat dua fungsi sinusoidal  $y_1 = 8 \sin 30^\circ$  dan  $y_2 = 6 \sin 90^\circ$ , maka dibuat diagram fasornya berupa dua vektor garis dengan panjang masing-masing 8 dan 10 satuan yang saling membentuk sudut  $60^\circ$ , lihat Gambar 4.8



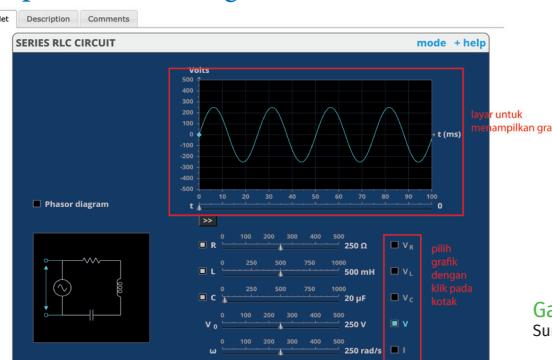
Gambar 4.8 Diagram fasor  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

## B. Karakteristik Rangkaian RLC



Aktivitas 4.2

Diskusikan bagaimana grafik tegangan dan arus listrik pada rangkaian resistor, induktor dan kapasitor. Jika akses internet tersedia, klik tautan atau pindai kode QR.<https://mathlets.org/mathlets/series-rlc-circuit/>



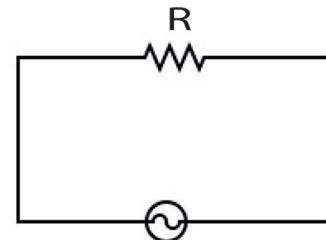
Gambar 4.9. Pengamatan virtual  
Sumber : MIT / mathlets (2022)

1. Atur nilai resistor, induktor dan kapasitor sesuai yang diinginkan.
2. Gambarkan masing-masing grafik komponen
  - a. Resistor:  $V_R$  dan  $I$
  - b. Kapasitor:  $V_c$  dan  $I$
  - c. Induktor:  $V_L$  dan  $I$
  - d. Tegangan total  $V$  dan  $I$
3. Tampilkan dan gambarkan diagram fasor untuk masing-masing komponen.

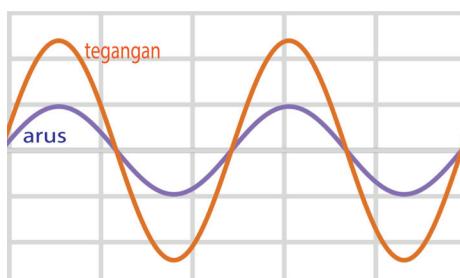
## 1. Resistor

Diagram resistor saat dihubungkan dengan tegangan bolak-balik terlihat pada Gambar 4.10. Arus bolak-balik mengalir pada resistor dengan fase sama dengan tegangannya.

Grafik tegangan  $V$  dan arus  $I$  terlihat pada Gambar 4.11. Saat tegangan naik, arus listrik naik pada interval waktu yang sama dengan amplitudo yang berbeda.



**Gambar 4. 10 Rangkaian resistor**  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



**Gambar 4. 11 Grafik  $V$  dan  $I$  resistor**  
Sumber : MIT / mathlets (2022)

Jika persamaan tegangan pada rangkaian murni resistor adalah:

$$V = V_{maks} \sin \omega t$$

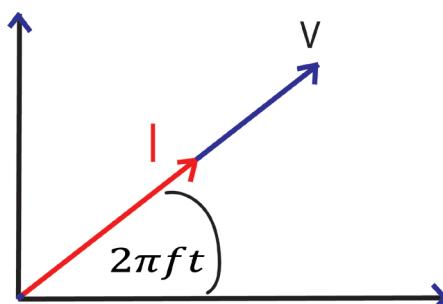
maka arus listriknya,

$$I = I_{maks} \sin \omega t$$

Ingatlah kembali hubungan arus dan tegangan saat belajar hukum Ohm, adalah  $V = I.R$

Oleh karena itu, pada Gambar 4.11, dapat terlihat grafik arus listrik lebih rendah amplitudonya dibandingkan grafik tegangan.

Adapun diagram fasornya dapat digambarkan searah (Gambar 4.12),  $V$  sefase dengan  $I$ .



**Gambar 4. 12 Diagram fasor resistor**  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

## 2. Induktor

Pada umumnya induktor merupakan lilitan kawat. Saat ada perubahan arus listrik yang mengalir melalui induktor, maka timbul GGL induksi.

Besarnya GGL induksi bergantung pada induktansi diri dan laju perubahan arusnya. Ingat kembali induktansi diri pada Bab 3. Ketika induktor dihubungkan dengan tegangan bolak-balik yang menyebabkan arus padanya berubah secara sinusoidal, induktor akan memiliki **reaktansi induktif**.

Reaktansi induktif serupa dengan hambatan pada resistor. Saat arus listrik bolak-balik mengalir pada induktor, induktor memiliki hambatan terhadap aliran arus listrik. Hal ini disebabkan adanya perubahan fluks magnet yang terjadi saat ada perubahan arus pada kumparan.

Analogi dengan hambatan pada resistor, hubungan tegangan  $V_L$  dan arus listrik  $I$  pada induktor adalah:

$$V_L = IX_L \quad (4-6)$$

dengan  $X_L$  yaitu reaktansi induktif ( $\Omega$ ) yang besarnya adalah

$$X_L = \omega L \quad (4-7)$$

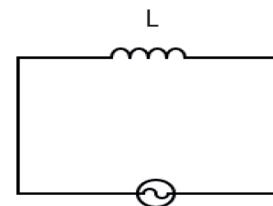
atau

$$X_L = 2\pi f L$$

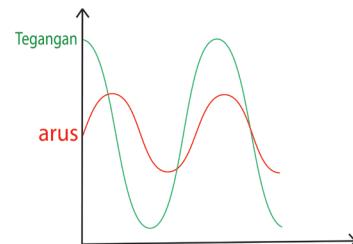
dengan  $L$  induktansi diri (Henry),  $f$  adalah frekuensi (Hz) dan  $X_L$  adalah reaktansi induktif ( $\Omega$ ).

Berdasarkan persamaan reaktansi induktif di atas, kalian dapat memahami bahwa semakin besar frekuensi arus bolak-balik, reaktansi induktif semakin besar. Namun jika induktor dihubungkan dengan arus searah ( $f = 0$ ), maka induktor tidak memiliki reaktansi induktif.

Grafik tegangan dan arus listrik pada induktor saat dihubungkan dengan tegangan bolak-balik terlihat pada Gambar 4.14. Grafik tegangan lebih dulu dari arus dengan beda fase  $\frac{\pi}{2}$  radian.



Gambar 4. 13 Diagram induktor  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



Gambar 4. 14 Grafik V dan I induktor  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Hal ini terjadi karena saat ada perubahan arus listrik, pada induktor timbul fluks induksi magnetik yang berlawanan sehingga arus listriknya

tertinggal seperempat siklus dari tegangan. Persamaan tegangan pada induktor:

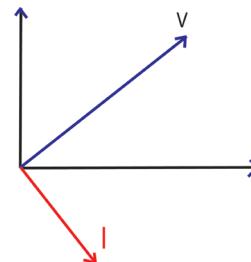
$$V_L = V_{maks} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (4-8)$$

sedangkan persamaan arus listriknya:

$$I = I_{maks} \sin \omega t \quad (4-9)$$

dengan  $\omega = 2\pi f$ .

Adapun diagram fasor untuk induktor dapat dilihat pada Gambar 4.15. Pada diagram, dapat dilihat  $V$  dan  $I$  berbeda sebesar  $90^\circ$  ( $\frac{\pi}{2}$  radian) dengan  $V$  mendahului arus listrik  $I$ .



Gambar 4. 15 Diagram fasor induktor murni  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

### 3. Kapasitor

Saat kapasitor dihubungkan dengan arus searah, kapasitor akan terisi muatan sampai penuh kemudian arus listriknya terputus. Berbeda karakteristiknya, saat kapasitor dihubungkan dengan arus bolak-balik. Analogi dengan resistor, kapasitor memiliki hambatan terhadap arus listrik saat dihubungkan dengan tegangan AC. Hambatan pada kapasitor saat dihubungkan tegangan bolak-balik dikenal dengan **reaktansi kapasitif**. Hubungan tegangan dan arus kapasitor dapat dinyatakan sebagai:

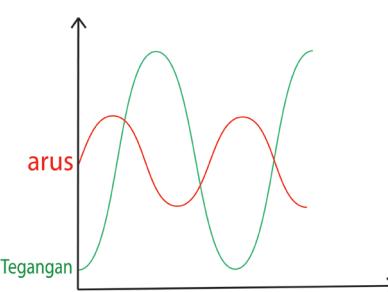
$$V_c = IX_c \quad (4-10)$$

dengan  $X_c$  = reaktansi kapasitif ( $\Omega$ ) yang besarnya yaitu

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (4-11)$$

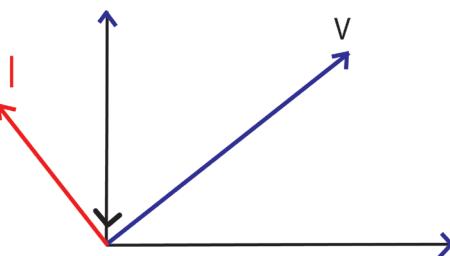
$C$  = kapasitas kapasitor (Farad) dan  $\omega = 2\pi f$

Grafik tegangan dan arus listrik bolak-balik pada rangkaian kapasitor dapat dilihat pada Gambar 4.17. Pada kapasitor, arus listrik terlebih dulu mengalir sampai kapasitor memiliki tegangan sama dengan tegangan sumber.



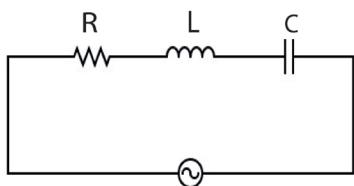
Gambar 4. 17 Grafik V dan I Kapasitor  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Oleh karena itu grafik arus listrik mendahului tegangan sebesar  $\frac{\pi}{2}$  radian atau  $90^\circ$ . Adapun & diagram fasor untuk kapasitor terlihat pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Diagram fasor kapasitor  
Sarah/Kemendikbudristek(2022) Sarah/Kemendikbudristek (2022)

## 4. Rangkaian R L C



Gambar 4.19 Rangkaian RLC  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Kapasitor (C) dan induktor (L) sering dirangkai secara seri dengan resistor (R) pada sebuah rangkaian kelistrikan. Analogi dengan rangkaian seri resistor yang memiliki hambatan total, rangkaian seri RLC memiliki besaran yang disebut **impedansi**, disimbolkan  $Z$ . Impedansi merupakan hambatan terhadap aliran arus yang merupakan perpaduan dari hambatan  $R$ , reaktansi induktif  $X_L$  dan reaktansi kapasitif  $X_C$ . Cara menentukan impedansi rangkaian arus bolak balik berbeda dengan cara menentukan hambatan total dari rangkaian arus searah, besar impedansi rangkaian bukan aljabar dari nilai hambatan dan reaktansinya. Sama juga dengan tegangan pada rangkaian, jika kalian mendapatkan nilai tegangan ujung- ujung resistor  $V_R$ , tegangan induktor  $V_L$  dan tegangan kapasitor  $V_C$  maka tegangan totalnya **bukan** hasil penjumlahan secara aljabar.



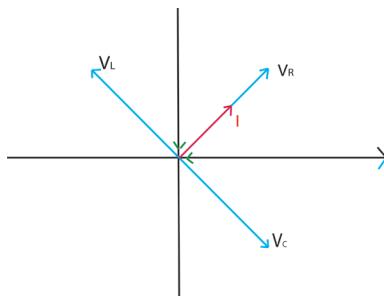
### Aktivitas 4.3

Perhatikan rangkaian RLC seperti pada Gambar 4.19. Diskusikan bagaimanakah hubungan besar tegangan total  $V$  dengan tegangan ujung resistor  $V_R$ , induktor  $V_L$  dan kapasitor  $V_C$ ? Jika akses internet tersedia, penyelidikan virtual dapat dilakukan melalui tautan atau pindai kode QR.



[https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kit-ac-virtual-lab/latest/circuit-construction-kit-ac-virtual-lab\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kit-ac-virtual-lab/latest/circuit-construction-kit-ac-virtual-lab_en.html)

Selain melalui penyelidikan, untuk mendapatkan tegangan total pada rangkaian RLC, dapat dilakukan dengan menganalisis diagram fasornya.



Gambar 4. 20 Diagram fasor RLC  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Perhatikan Gambar 4. 20. Arus listrik sefase dengan  $V_R$  namun berbeda fase  $90^\circ$  dengan  $V_L$  dan  $V_C$ . Karena berlawanan arah, resultan  $V_L$  dan  $V_C$  yaitu  $V_L - V_C$ . Arah  $V_L - V_C$  tegak lurus terhadap  $V_R$  sehingga:

Tegangan total pada rangkaian RLC adalah:

$$V^2 = V_R^2 + (V_L - V_C)^2 \quad (4-12)$$

dengan  $V$  adalah tegangan total (volt),  $V_R$  adalah tegangan resistor (volt),  $V_L$  adalah tegangan induktor (volt) dan  $V_C$  adalah tegangan kapasitor (volt).

Analogikan hukum Ohm tentang persamaan tegangan dan arus listrik, maka persamaan di atas dapat diuraikan menjadi:

$$(IZ)^2 = (IR)^2 + (IX_L - IX_C)^2.$$

Karena arus listrik yang mengalir pada rangkaian seri untuk semua komponen sama besar maka:

Impedansi rangkaian RLC dapat dinyatakan sebagai:

$$(Z)^2 = (R)^2 + (X_L - X_C)^2$$

atau

$$Z = \sqrt{(R)^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (4-13)$$

dengan  $Z$  adalah impedansi ( $\Omega$ ),  $R$  adalah hambatan ( $\Omega$ ),  $X_L$  adalah reaktansi induktif ( $\Omega$ ) dan  $X_C$  adalah reaktansi kapasitif ( $\Omega$ ).

Jika persamaan arus bolak balik pada rangkaian RLC adalah

$$I = I_{\text{maks}} \sin \omega t \quad (4-14)$$

Maka persamaan tegangannya dapat dinyatakan sebagai :

$$V = V_{\text{maks}} \sin (\omega t \pm \varphi) \quad (4-15)$$

Sudut  $\varphi$  merupakan beda sudut fase antara tegangan  $V$  dan arus listrik  $I$ . Sudut  $\varphi$  dapat dicari dengan:

$$\tan \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} \quad (4-16)$$

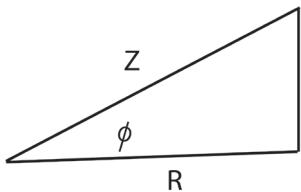


Diagram antara  $X_L$ ,  $X_C$  dan  $R$  terlihat pada Gambar 4.21. Persamaan tangensial (4-16) juga dapat dinyatakan dalam persamaan cosinus menjadi:

$$\cos \theta = \frac{R}{Z} \quad (4-17)$$

Gambar 4. 21 Diagram impedansi  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Sudut fase ini sangat penting karena berpengaruh dalam memberi daya disipasi rata-rata pada rangkaian. **Daya disipasi** pada rangkaian RLC dihasilkan oleh resistor akibat panas yang timbul pada resistor saat mengalir arus listrik. Daya disipasi ini tidak timbul pada induktor dan kapasitor, sehingga

besar daya disipasi pada rangkaian RLC adalah:

$$P = I_{ef}^2 R \quad (4-18)$$

dengan  $P$  adalah daya disipasi (watt),  $I_{ef}$  adalah arus efektif atau arus rms (ampere),  $R$  adalah hambatan ( $\Omega$ ). Karena  $R=Z \cos \theta$ , maka persamaan daya disipasi dapat dinyatakan juga sebagai:

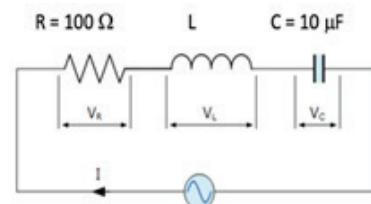
$$P = I_{ef}^2 Z \cos \theta \quad (4-19)$$

oleh karena itu  $\cos \theta$  disebut sebagai **faktor daya**.



Ayo, Cek Pemahaman!

1. Rangkaian RLC terdiri dari resistor  $100 \Omega$ , kapasitor  $10\mu F$  dan induktor yang belum diketahui induktansinya dihubungkan secara seri pada sumber tegangan  $9V$ ,  $50Hz$ . Jika hasil pengukuran tegangan ujung-ujung resistor sebesar  $V_R = 4V$ , tentukan:
  - a. arus rangkaian,
  - b. impedansi rangkaian total,
  - c. tegangan induktor
  - d. induktansi induktor



#### Aktivitas 4.4. Aplikasi Konsep

##### Tujuan

Menentukan induktansi kumparan saat dihubungkan dengan tegangan AC.

### Alat dan Bahan

- resistor  $100\ \Omega$
- kapasitor  $10\ \mu F$
- kumparan 1200 lilitan / kumparan 600 lilitan
- inti besi
- papan rangkaian
- catu day
- multimeter.

### Langkah Kegiatan:

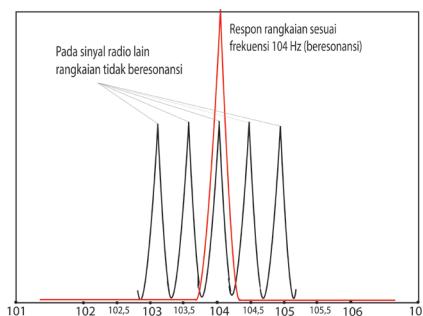
1. Rangkai resistor, kapasitor, induktor (dalam hal ini kumparan berperan sebagai induktor) secara seri kemudian hubungkan dengan catu daya.
2. Hidupkan catu daya pada mode AC dengan tegangan 12V.
3. Ukur tegangan resistor ( $V_R$ ), tegangan kapasitor ( $V_c$ ), tegangan induktor ( $V_L$ ), tegangan total rangkaian ( $V$ ) serta arus pada rangkaian.
4. Ubah tegangan catu daya menjadi 9V, 6V dan 3V kemudian ukur kembali tegangan dan arusnya seperti pada langkah nomor 3 dan tuliskan pada tabel pengamatan.
5. Berdasarkan data yang diperoleh, tentukan besar induktansi kumparan.
6. Masukan inti besi ke dalam kumparan, kemudian tentukan kembali induktansi kumparan dengan mengikuti langkah nomor 2 sampai 4. Buat kesimpulan hasil percobaan.

## C. Resonansi Rangkaian

Radio merupakan salah satu produk teknologi yang menggunakan prinsip resonansi pada *tuner* pencari frekuensi. Popularitas radio memang sudah menurun karena adanya perkembangan teknologi video daring atau *podcast* (siniar daring), tapi radio relatif masih banyak digunakan sampai sekarang.

Teknologi *tuner* radio terdiri dari resistor dan kapasitor varibel. Saat ingin menangkap sinyal radio berfrekuensi tertentu, *tuner* mengubah nilai kapasitor sehingga rangkaian memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi sinyal.

Perhatikan gambar 4.22 tersebut, beberapa frekuensi radio yang dipancarkan stasiun terlihat pada Gambar. Ketika rangkaian diinginkan menangkap sinyal tertentu maka tuner digunakan untuk mengubah nilai kapasitansi rangkaian sampai diperoleh frekuensi rangkaian yang sama dengan frekuensi radio. Frekuensi yang ditangkap rangkaian yaitu 104 MHz. Selain pada tuner radio, prinsip resonansi juga digunakan pada alat BIA (*Bioelectrical Impedance Analysis*) dan *microphone* (*speaker* telepon).



Gambar 4.22 Beberapa frekuensi radio  
Sumber :UF Physics/University of Florida (2022)

Pada materi getaran, kalian belajar bagaimana resonansi terjadi pada sebuah benda akibat benda lain yang bergetar didekatnya. Frekuensi terjadi saat frekuensi getaran sama dengan frekuensi alamiah dari benda. Misalkan pada sistem pegas, frekuensi alamiahnya yaitu  $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ . Analogi dengan getaran, pada rangkaian RLC, peristiwa resonansi dapat terjadi jika frekuensi tegangan memenuhi nilai tertentu.



#### Aktivitas 4.5

Coba diskusikan bagaimana syarat terjadinya resonansi pada rangkaian RLC, kemudian tentukan frekuensi resonansi rangkaian RLC yang dihubungkan tegangan AC.

Jika akses internet tersedia, penyelidikan virtual dapat dilakukan pada tautan atau pindai kode QR.

[http://www.phy.hk/wiki/j/Eng/RLC/RLC\\_js.htm](http://www.phy.hk/wiki/j/Eng/RLC/RLC_js.htm)

Klik pada tombol “**set resonance**”, kemudian lihat nilai frekuensi resonansinya.



Arus maksimum diperoleh saat impedansinya minimum. Impedansi minimum terjadi saat frekuensinya menyebabkan reaktansi induktif sama dengan reaktansi kapasitif ( $X_L = X_C$ ) atau  $Z = R$ ,

$$X_L = X_C \text{ atau } \omega L = \frac{1}{\omega C} \text{ maka, } \omega^2 = \frac{1}{LC} \text{ atau } \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

frekuensi resonansi rangkaian RLC:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (4-20)$$

Frekuensi resonansi ( $f$ ) rangkaian RLC dipengaruhi oleh besar induktansi ( $L$ ) dan kapasitansi rangkaian ( $C$ ), tapi tidak dipengaruhi besar hambatan resistornya ( $R$ ).



#### Ayo, Cek Pemahaman!

Sebuah radio menggunakan prinsip resonansi rangkaian RLC untuk menangkap siaran yang dipancarkan dengan frekuensi tertentu. Jika saat menangkap siaran dengan frekuensi 90 MHz, kapasitas kapasitornya adalah  $C$ , maka tentukan kapasitas kapasitor saat radio menangkap sinyal radio berfrekuensi 105 MHz.

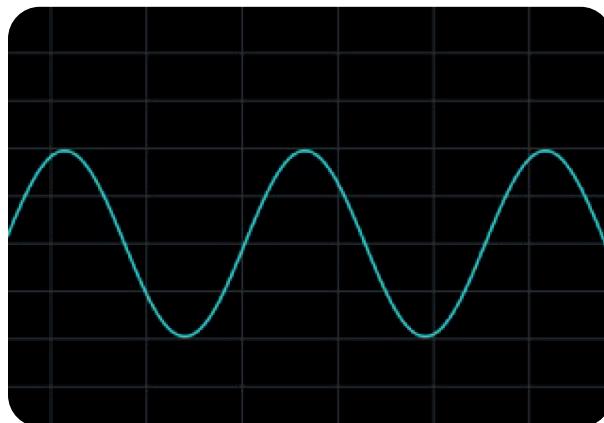
#### Rangkuman

1. Persamaan tegangan bolak balik berupa sinusoidal,  
$$V = V_{maks} \sin \omega t$$
2. Hubungan tegangan efektif dan tegangan maksimum :  
$$V_{maks} = V_{ef} \sqrt{2}$$
3. Nilai arus atau tegangan efektif setara dengan nilai arus searah atau tegangan searah yang terukur oleh amperemeter atau voltmeter.
4. Induktor dan kapasitor akan memiliki karakteristik hambatan saat diberi sumber arus bolak balik.
5. Reaktansi induktif dimiliki oleh induktor saat dihubungkan dengan tegangan AC,  $X_L = \omega L$
6. Reaktansi kapasitif dimiliki oleh kapsitor saat dihubungkan dengan tegangan AC,

7. Tegangan rangkaian RLC,  $V^2 = V_R^2 + (V_L - V_C)^2$
8. Impedansi rangkaian RLC,  $Z = \sqrt{(R)^2 + (X_L - X_C)^2}$
9. Daya disipasi pada rangkaian RLC merupakan daya yang dihasilkan oleh resistor yang berubah menjadi panas sehingga persamaannya,  $P = I_{ef}^2 R$
10. Resonansi rangkaian RLC terjadi ketika reaktansi induktif sama dengan reaktansi kapasitif rangkaian.
11. Besar frekuensi resonansi rangkaian RLC,  $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$

### Asesmen

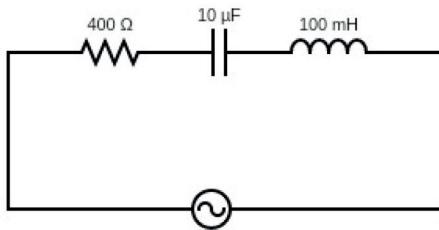
1. Sebuah osiloskop digunakan untuk melihat sinyal kelistrikan yang dihasilkan dinamo sebuah mobil. Grafik pada osiloskop terlihat seperti Gambar 4.23.



**Gambar 4. 23 Grafiksinyal dinamo AC**  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Jika pada arah vertikal pengaturan osiloskop yaitu 2,5 V/div, maka tentukan tegangan efektif berdasarkan grafik tersebut.

2. Sebuah rangkaian RLC dihubungkan dengan AC secara seri seperti Gambar 4.24.



**Gambar 4. 24 Rangkaian RLC**  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

Jika arus pada rangkaian sebesar 0,1 A dan frekuensi tegangannya 50 Hz, tentukan:

- impedansi rangkaian
  - tegangan total pada rangkaian
  - diagram grafik tegangan.
3. Gambar 4.25 menunjukkan alat pendeksi logam yang sedang digunakan. Alat pendeksi ini menggunakan dua rangkaian osilator kapasitor induktor, A dan B. Masing-masing osilator menghasilkan frekuensi resonansinya sendiri,  $f_{0A} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_A C}}$  dan  $f_{0B} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_B C}}$ . Adanya logam yang terdeteksi menyebabkan beda frekuensi ketukan  $|f_{0A} - f_{0B}|$ . Jika tidak ada logam di dekat osilator, induktansi  $L_A$  sama dengan induktansi  $L_B$ , dan  $f_{0A}$  sama dengan  $f_{0B}$ , serta tidak ada frekuensi ketukan. Ketika induktor B (kumparan pencari mendekati sepotong logam, induktansi  $L_B$  meningkat, frekuensi osilator  $f_{0B}$  menurun, dan barulah frekuensi ketukan terdengar.

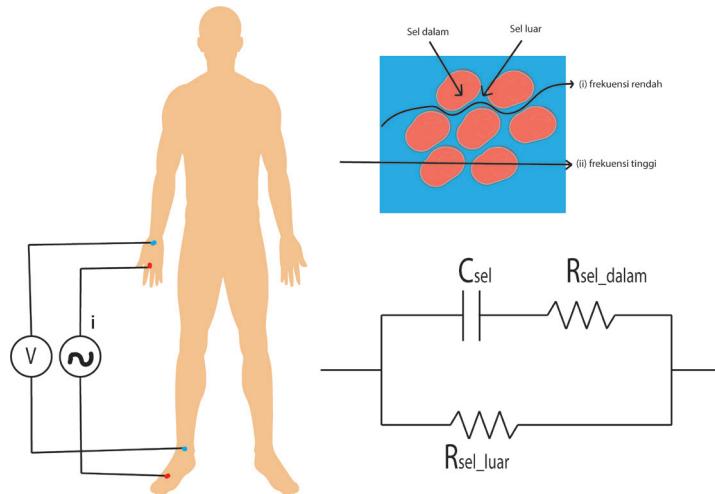


**Gambar 4. 25 Pendeksi logam**  
Sumber : Miya/Wikimedia Commons (2004)

Mula-mula setiap induktor diatur sehingga  $L_B = L_A$ , dan masing-masing osilator memiliki frekuensi resonansi 855,5 kHz. Asumsikan bahwa induktansi kumparan B meningkat sebesar 1.000% karena sepotong logam di dekatnya, tentukan frekuensi ketukan yang terdengar melalui pengeras suara.

## Pengayaan

### BIA (*Bioelectrical Impedance Analysis*)



Gambar 4.26 Prinsip Kerja BIA

Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikbudristek (2022)

*Bioelectrical Impedance Analysis* (BIA) merupakan teknik pengukuran komposisi tubuh. Pada umumnya pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kesehatan seseorang. Komposisi tubuh meliputi kadar lemak, kadar air dan massa otot dianalisis melalui pengukuran ini, berdasarkan prinsip impedansi rangkaian. Coba lakukan penyelidikan lebih lanjut mengenai prinsip kerjanya dari berbagai sumber.

## Refleksi

Setelah kalian mempelajari Bab 4 Arus Listrik Bolak-Balik:

1. Hal apa yang menarik pada materi arus bolak-balik?
2. Apakah kalian sudah memahami konsep-konsep esensial pada materi arus listrik bolak-balik?
3. Materi apa pada Bab 4 Arus Listrik Bolak-balik yang masih belum dipahami?

4. Keterampilan apa yang baru kalian untuk meningkatkan pemahaman materi arus bolak balik ini?



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI  
REPUBLIK INDONESIA 2022**

**Fisika untuk SMA/MA Kelas XII**

Penulis : Lia Laela Sarah, Irma Rahma Suwarma

ISBN : 978-623-472-722-7 (jil.2)

Sumber: kipargeter/freepik (2022)

# BAB 5

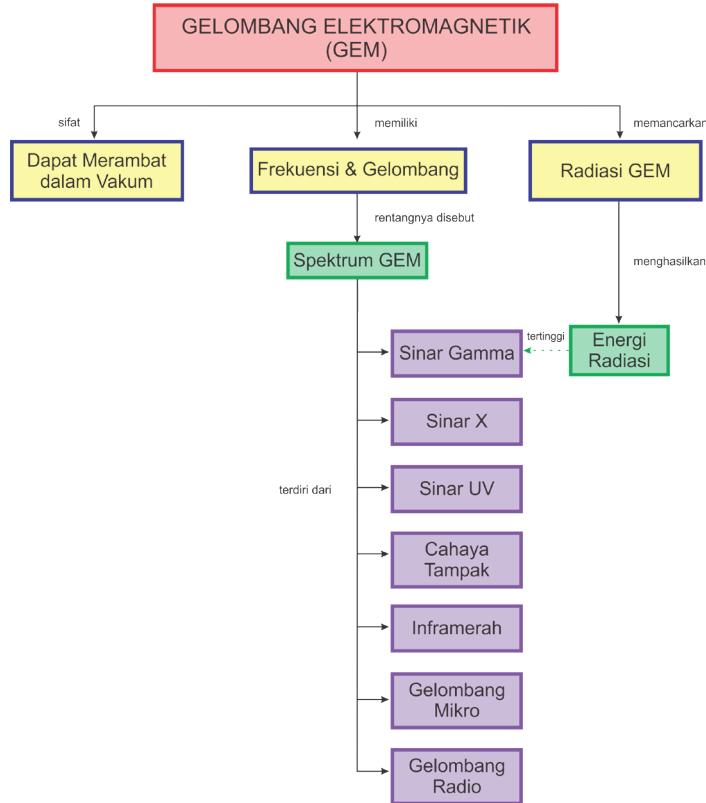
## GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK

### Kata Kunci

Sifat-sifat GEM • Spektrum GEM • Laju GEM • Energi GEM • Manfaat GEM

#### Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, kalian dapat mengidentifikasi gelombang elektromagnetik (proses terjadinya, sifat-sifat, spektrum, dan laju gelombang elektromagnetik), serta pemanfaatannya dalam kehidupan sehari-hari.



**Gambar 5. 1 Peta Konsep Gelombang Elektromagnetik**

Sumber : Kinkin Suartini/Kemendikbudristek (2022)



**Gambar 5. 2 Contoh aplikasi GEM**

sumber: unknown/freepik(2022)

Gelombang elektromagnetik dalam kehidupan sehari-hari, digunakan untuk berbagai kebutuhan, seperti berkomunikasi melalui panggilan telepon seluler dan memeriksa suhu tubuh. Bagaimana gelombang elektromagnetik ini dihasilkan? Apa saja yang termasuk gelombang elektromagnetik?



## Ayo, Mengingat Kembali!

Berdasarkan arah perambatan, gelombang dibagi menjadi gelombang longitudinal dan gelombang transversal. Arah rambat gelombang transversal tegak lurus terhadap arah getarnya, sedangkan arah rambat gelombang longitudinal sejajar dengan arah getarnya. Berdasarkan medium perambatannya terdiri dari gelombang mekanik dan elektromagnetik. Gelombang mekanik adalah gelombang yang memerlukan medium perambatan sedangkan gelombang elektromagnetik tidak memerlukan medium perambatan.

Coba diskusikan dan identifikasi, gelombang elektromagnetik apa saja yang ada di sekitar kalian!



### Aktivitas 5.1

Diskusikan bagaimana gelombang elektromagnetik dihasilkan dan bagaimana sifat-sifatnya. Jika akses internet tersedia, dapat dilakukan simulasi pada tautan di bawah atau pindai kode QR.



[https://javalab.org/en/electromagnetic\\_wave\\_en/](https://javalab.org/en/electromagnetic_wave_en/)

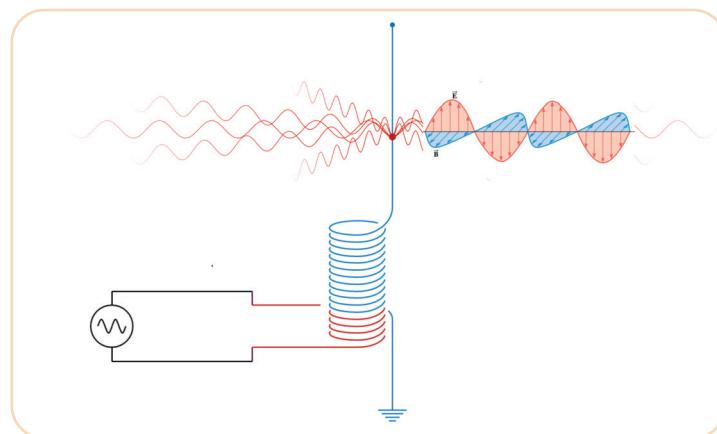
## A. Perambatan Gelombang Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik dihasilkan dari perambatan medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus melewati ruang. Teori gelombang elektromagnetik pertama kali dikemukakan oleh James Clark Maxwell (1831-1879) pada tahun 1865 dengan hipotesisnya bahwa *“Perubahan medan magnet dapat menimbulkan medan listrik, sebaliknya perubahan medan listrik dapat menimbulkan perubahan medan magnet.”* Hipotesis ini merupakan penggabungan teori kelistrikan dan kemagnetan yang dikemukakan oleh Hans Christian Oersted (1777-1851), Michael Faraday (1791-1867), dan André-Marie Ampère (1775–1836).

Medan listrik dihasilkan dari sebuah muatan listrik sedangkan medan magnet dihasilkan oleh perubahan medan listrik, sehingga ketika muatan

berosilasi dihasilkan perubahan medan listrik dan medan magnet. Jika proses ini berulang secara terus menerus, maka medan listrik dan medan magnet yang arahnya tegak lurus akan merambat membentuk gelombang elektromagnetik.

Perhatikan Gambar 5.3, nampak sebuah tiang konduktor pemancar yang mentransmisikan gelombang elektromagnetik.



Gambar 5.3 Perambatan GEM  
sumber: unknown/javalab(2022), Cutnell/Physics(2012)

Besar medan listrik dan medan magnet yang dihasilkan dipengaruhi oleh besar arus listrik dari sumber tegangan, demikian juga arahnya dipengaruhi oleh arah arus pada kawat tersebut. Jika tiang pemancar diberi arus bolak-balik dengan persamaan sinusoidal, maka besar medan listrik dan medan magnet juga berupa fungsi sinusoidal.

Ingatlah bahwa besar medan listrik ditentukan oleh besar muatan. Oleh karena itu, saat tiang pemancar mengalami perubahan listrik maka medan listriknya akan mengalami perubahan. Perubahan arus listrik ini menghasilkan medan magnet. Besar medan magnet ditentukan oleh besar dan arah arus listrik sehingga ketika ada perubahan arus, medan magnet juga mengalami perubahan.

Arah medan magnet selalu tegak lurus dengan arah medan listrik yang dihasilkan (ingat kembali konsep bab 3) dan arah keduanya selalu tegak lurus dengan arah perambatan gelombangnya. Bentuk sederhana persamaan medan listrik ( $E$ ) dan medan magnet ( $B$ ) dari gelombang elektromagnetik dapat dinyatakan menggunakan fungsi sinusoidal (sinus atau cosinus), misalnya:

$$E = E_{\max} \sin(\omega t \pm kx) \quad (5-1)$$

$$B = B_{\max} \sin(\omega t \pm kx) \quad (5-2)$$

dengan  $E_{max}$  adalah medan listrik maksimum dan  $B_{max}$  adalah medan magnet maksimum sedangkan  $\omega$  adalah frekuensi sudut osilasi dari sumber gelombang.

Laju gelombang elektromagnetik di ruang hampa, Maxwell menentukannya secara teori dengan persamaan:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (5-3)$$

dengan  $\epsilon_0$  adalah permitivitas listrik di ruang hampa sebesar  $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 (\text{N m}^2)$  dan  $\mu_0$  adalah permeabilitas magnetik di ruang hampa sebesar  $4 \pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$ . Coba sekarang kalian hitung nilai laju perambatan gelombang elektromagnetik dengan memasukan nilai  $\epsilon_0$  dan  $\mu_0$ .



#### Ayo, Tentukan!

Laju gelombang elektromagnetik di ruang hampa =

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \dots$$

Laju gelombang elektromagnetik bergantung jenis mediumnya, sehingga persamaannya menjadi:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

dengan  $\epsilon$  adalah permitivitas listrik di medium dan  $\mu$  adalah permeabilitas magnetik medium.

Contoh fenomena laju gelombang elektromagnetik dalam medium air. Besar laju gelombang elektromagnetik menjadi lebih kecil saat merambat dalam medium air karena panjang gelombangnya menjadi lebih kecil meskipun frekuensinya tetap.

Laju rambat gelombang elektromagnetik dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$v = \lambda f \quad (5-4)$$

dengan  $v$  adalah laju cahaya (m/s) dan berlaku untuk gelombang elektromagnetik lainnya sebesar  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $\lambda$  adalah panjang gelombang (m) dan  $f$  adalah frekuensi (Hz). Frekuensi gelombang elektromagnetik ditentukan oleh frekuensi osilasi muatan sebagai sumber gelombangnya. Misalnya untuk gelombang radio FM frekuensinya 88 sampai 108 MHz.



### 5.1 Ayo, Cek Pemahaman!

1. Berdasarkan informasi pada materi di atas, tentukan rentang panjang gelombang untuk gelombang radio FM.
2. Komang yang sedang berada di Bali melakukan panggilan telepon seluler pada Ridwan, temannya di Bandung. Perkirakan berapa lama sinyal gelombang elektromagnetik dari Bali akan sampai ke Bandung jika sinyal ditransmisikan melewati satelit yang berjarak 36000 km dari permukaan bumi?

## B. Spektrum Gelombang Elektromagnetik

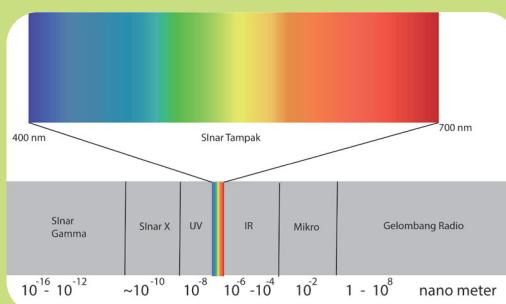
Gelombang elektromagnetik memiliki rentang frekuensi yang sangat lebar. Urutan rentang frekuensi atau panjang gelombang dari gelombang elektromagnetik ini disebut spektrum elektromagnetik.

Perhatikan Gambar 5.4, spektrum elektromagnetik berdasarkan frekuensinya secara berurutan terdiri dari sinar gamma, sinar X, sinar UV, cahaya tampak, inframerah, gelombang mikro dan gelombang radio. Berapa panjang gelombang, frekuensi dan energi untuk masing-masing spektrum gelombang elektromagnetik?



### Aktivitas 5.2

Perhatikan gambar spektrum gelombang elektromagnetik Gambar 5.4 dan eksplorasi dari berbagai sumber.



Gambar 5.4 Frekuensi spektrum GEM  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

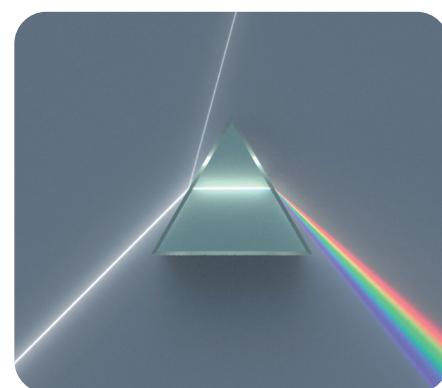
Lengkapi nilai panjang gelombang, frekuensi, dan contoh aplikasi setiap gelombang elektromagnetik pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Spektrum Gelombang Elektromagnetik

Gelombang Elektromagnetik	Panjang Gelombang (m)	Frekuensi (Hz)	Contoh Pemanfaatan
Sinar Gamma			
Sinar X			
Sinar Ultraviolet			
Cahaya Tampak - Ungu - Biru - Hijau - Kuning - Jingga - Merah			
Infra Merah			
Gelombang Mikro			
Gelombang Radio			

Gelombang elektromagnetik dihasilkan oleh berbagai sumber. Misalnya sinar gamma dihasilkan oleh peluruhan zat radioaktif dan radiasi kosmik, sinar X dihasilkan oleh perlambatan elektron berkecepatan tinggi secara tiba-tiba dalam tabung ruang hampa sedangkan gelombang mikro dihasilkan oleh tabung elektron. Sinar gamma memiliki frekuensi tertinggi, demikian juga energinya. Energi radiasi yang berasal dari peluruhan radioaktif ini mampu mengionisasi atom lain (*ionizing radiation*) sehingga sangat berbahaya jika seseorang terpapar radiasi sinar gamma.

Cahaya tampak merupakan spektrum gelombang elektromagnetik yang dapat dilihat mata. Cahaya tampak diemisikan oleh benda panas seperti matahari dan filamen lampu. Cahaya tampak mulai dari sinar merah dengan panjang gelombang terpanjang sampai sinar ungu dengan panjang gelombang terpendek. Panjang gelombangnya antara 400 nm sampai 750 nm. Sinar merah, ungu dan cahaya tampak lainnya dikenal dengan cahaya

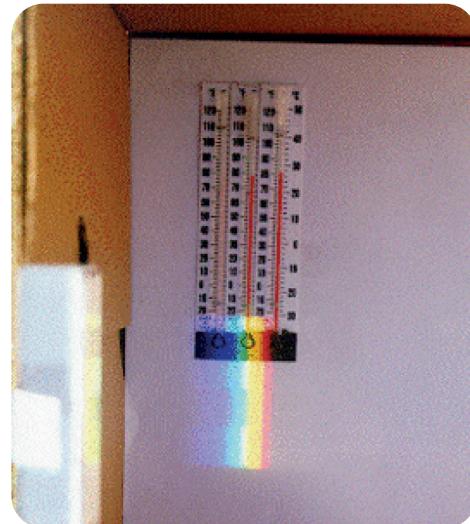


Gambar 5.5 Penguraian cahaya matahari  
Sumber : Peo/commonswiki (2022)

monokromatik, yaitu cahaya yang hanya memiliki satu warna atau satu panjang gelombang.

Sinar matahari merupakan cahaya polikromatik yaitu cahaya yang dapat diuraikan menjadi spektrum cahaya monokromatik. Contoh terjadi pada peristiwa pembentukan pelangi dan penguraian cahaya matahari oleh prisma kaca. Hasil penguraian cahaya matahari pada prisma tidak hanya menghasilkan cahaya tampak namun juga gelombang elektromagnetik lainnya yang tidak terlihat seperti inframerah.

William Herschel (1738-1822) pada tahun 1800 melakukan eksperimen untuk menemukan perubahan suhu pada setiap warna yang dihasilkan dari penguraian cahaya matahari melalui prisma kaca. Herschel menemukan cahaya yang tidak terlihat disamping cahaya merah memiliki perubahan suhu tertinggi. Berdasarkan eksperimennya, Herschel menyimpulkan keberadaan sinar inframerah dari hasil penguraian sinar matahari oleh prisma kaca. Selain dipancarkan oleh sinar matahari, sinar inframerah juga dipancarkan oleh benda-benda lainnya yang disebabkan vibrasi dan rotasi molekul di dalam material.



Gambar 5.6 Eksperimen Herschel  
Sumber : Coolcosmos/Caltech.edu (2022)



### 5.2 Ayo, Cek Pemahaman!

Berikut ini beberapa pernyataan mengenai spektrum gelombang elektromagnetik. Berikan tanda ceklis pada pernyataan yang benar.

1	Urutan spektrum gelombang elektromagnetik cahaya tampak mulai panjang gelombang terbesar yaitu: Ungu – biru – hijau – kuning – jingga - merah	
2	Gelombang mikro tidak dapat digunakan pada bidang telekomunikasi	
3	Radiasi sinar gamma berbahaya bagi Kesehatan karena energinya dapat mengionisasi atom.	

4	Termometer tembak menggunakan fakta bahwa seluruh objek memancarkan radiasi infra merah karena vibrasi dan rotasi molekul di dalam material	
5	Panjang gelombang radio dan televisi lebih besar dari panjang gelombang yang dapat dideteksi mata manusia.	

## C. Energi Gelombang Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik sama seperti gelombang lainnya, merambat dengan membawa energi. Energinya dibawa oleh medan listrik dan medan magnet yang biasa dinyatakan dalam rapat energi. Rapat energi adalah besar energi tiap satuan volume ruang dimana energi merambat. Total rapat energi gelombang elektromagnetik besarnya dapat dinyatakan:

$$u = \frac{\text{energi}}{\text{volume}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (5-5)$$

dengan  $u$  adalah rapat energi ( $\text{Joule/m}^3$ ),  $E$  adalah kuat medan listrik ( $\text{N/C}$ ) dan  $B$  adalah kuat medan magnet ( $\text{tesla}$ ). Gelombang elektromagnetik saat merambat di udara atau ruang hampa, medan listrik dan medan magnetnya membawa sejumlah energi yang sama tiap satuan volumenya,

$$\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (5-6)$$

maka persamaan rapat energi dapat dinyatakan:

$$u = \epsilon_0 E^2 \quad (5-7)$$

atau

$$u = \frac{1}{\mu_0} B^2 \quad (5-8)$$

Pada keadaan maksimum, hubungan antara medan listrik dan medan magnet dapat dinyatakan:

$$\frac{E_0^2}{B_0^2} = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}$$

Substitusikan persamaan laju gelombang elektromagnetik maka:

Untuk gelombang elektromagnetik yang merambat di udara atau ruang hampa, hubungan medan listrik maksimum dan medan magnet maksimum dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{E_0}{B_0} = c \quad (5-9)$$

dengan  $E_0$  adalah medan listrik maksimum (N/C),  $B_0$  adalah medan magnet maksimum (tesla) dan  $c$  adalah laju gelombang elektromagnetik (m/s).

Energi yang melewati tiap satuan luas tiap satuan waktu atau intensitasnya dinyatakan dengan:

$$S = \frac{\text{total energi}}{\text{waktu} \times \text{luas}} = \frac{\text{rapat energi} \times \text{volume}}{\text{waktu} \times \text{luas}} = \frac{u(ctA)}{tA} = uc$$

$$S = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} c$$

Intensitas gelombang elektromagnetik dapat dinyatakan:

$$S = c \epsilon_0 E^2 = \frac{c}{\mu_0} B^2 = \frac{EB}{\mu_0}$$

dengan  $S$  adalah intensitas gelombang elektromagnetik (Watt/m<sup>2</sup>). Karena medan listrik dan medan magnet pada gelombang elektromagnetik berupa fungsi sinusoidal, maka persamaan di atas berlaku untuk kondisi sesaat. Untuk mendapatkan nilai efektifnya, dapat menggunakan analogi dengan persamaan arus bolak balik. Medan listrik efektif (*root mean square*) yaitu:

$$E_{ef} = \frac{E_0}{1,41} \text{ atau } E_{ef} = \frac{E_0}{\sqrt{2}}$$

dan medan magnet efektif (*root mean square*)

$$B_{ef} = \frac{B_0}{ef} \text{ atau } B_{ef} = \frac{B_0}{\sqrt{2}}$$

Substitusi nilai efektifnya, sehingga

**persamaan intensitas gelombang rata-ratanya:**

$$\bar{S} = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2\mu_0} c B_0^2 = \frac{E_0 B_0}{2\mu_0}$$

atau

$$\overline{S} = \frac{E_{ef}B_{ef}}{\mu_0} \quad (5-10)$$



### 5.3 Ayo, Cek Pemahaman!

Intensitas radiasi sinar matahari mencapai ke bumi (di atas atmosfer) sekitar 1350 Watt / m<sup>2</sup>. Asumsikan radiasi ini merupakan gelombang elektromagnetik tunggal, hitung kuat medan listrik dan medan magnet maksimumnya

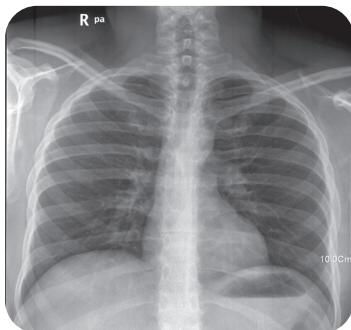
## D. Pemanfaatan Gelombang Elektromagnetik



### Aktivitas 5.3

Baca dan pahami beberapa contoh pemanfaatan gelombang elektromagnetik (GEM) dalam kehidupan sehari-hari di bawah ini. Kemudian secara berkelompok, pilih salah satu tema pemanfaatan yang menarik untuk kalian bahas dan diskusikan lebih mendalam. Lakukan tinjauan pustaka dari berbagai sumber untuk melengkapi dasar teori bagaimana pemanfaatan GEM tersebut kemudian secara kreatif sajikan hasil diskusi kalian baik secara digital atau karya kreatif lainnya kemudian presentasikan.

### 1. Sinar Gamma dan Sinar X



Gambar 5.7 Hasil pencitraan sinar X  
sumber: Nevit Dilmen/Wikimedia Commons(2011)

Gelombang elektromagnetik banyak dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari sesuai dengan tingkat energinya. Misal sinar gamma, dengan tingkat energi yang tinggi mampu mengionisasi sel sehingga dimanfaatkan untuk membunuh sel kanker, sterilisasi alat kedokteran dan bedah saraf otak. Demikian pula dengan energi sinar X dapat mengionisasi sel sehingga sangat berbahaya jika terpapar berlebihan. Energi sinar X dapat diserap oleh jaringan tubuh, karenanya sinar X

kemudian dimanfaatkan dalam pencitraan jaringan tubuh untuk mengetahui beberapa jenis penyakit.

Sinar X akan diserap jaringan tubuh sehingga intensitasnya berkurang saat melewatkannya. Semakin padat material penyusun tubuh (seperti jaringan tulang) intensitas sinar X yang diserap akan semakin besar. Perbedaan intensitas yang diproyeksikan menjadi gambar ini dianalisis untuk menentukan apakah ada kelainan pada jaringan tersebut. Pembahasan mengenai sinar X dan sinar gamma lebih lanjut dijabarkan pada bab 8 dan bab 9.

## 2. Sinar Ultraviolet (UV)

Sinar ultraviolet (UV) memiliki panjang gelombang lebih pendek dari sinar ungu namun lebih panjang dari sinar X, antara 40 – 400 nm. Sinar ultraviolet banyak terdapat pada sinar matahari. Sekitar 10% spektrum yang dihasilkan dari cahaya matahari adalah ultraviolet. Selain itu ultraviolet juga dihasilkan oleh lampu-lampu khusus seperti lampu uap merkuri dan lampu *fluorescent*. Sinar ultraviolet tidak dapat dilihat oleh mata manusia namun beberapa jenis hewan seperti burung, serangga dan beberapa jenis mamalia dapat melihat sinar ultraviolet pada panjang gelombang 300 – 400 nm yang disebut *Near-UV*.

Radiasi UV dari Matahari berperan penting dalam kehidupan dan mempengaruhi hampir semua organisme hidup. Ada keuntungan atau manfaat dari sinar UV namun terdapat pula efek bahayanya. Mendapatkan radiasi sinar ultraviolet dari Matahari yang berlebihan berbahaya bagi tubuh namun jika radiasi yang didapatkan sesuai kebutuhan, maka akan sangat bermanfaat. Radiasi UV pada panjang gelombang 320-400 nm, yang disebut UV-A, bermanfaat dalam pembentukan Vitamin D oleh tubuh.

Sinar Matahari juga menjadi alternatif untuk penyembuhan salah satu penyakit yang dikenal dengan *psoriasis* dan *eksfolif cheilitis*, yaitu kondisi penyakit ketika sel-sel tubuh membelah lebih cepat dari seharusnya. Radiasi yang berlebihan juga berbahaya bagi kulit yakni menyebabkan kulit terbakar, berbagai sindrom penyakit kulit dan katarak. Radiasi yang masuk pada panjang gelombang lebih pendek, 280-320 nm yang disebut UV-B dapat menyebabkan kerusakan pada tingkat molekuler sel jaringan tubuh bahkan kanker kulit.

Sinar UV yang bukan bersumber dari sinar matahari banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang kesehatan, industri maupun biologi. Ultraviolet juga digunakan pada bidang kesehatan, yaitu untuk sterilisasi fasilitas medis dengan menggunakan lampu ultraviolet. Pada tingkat energi yang cukup, sinar ultraviolet dapat membuat mikroorganisme tidak dapat bereproduksi dan tidak berbahaya. UV juga digunakan untuk sterilisasi jenis makanan dan air minum. Begitu pula pada bidang industri, ultraviolet banyak

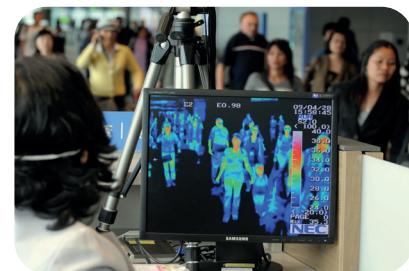
digunakan baik sebagai pendekripsi kebakaran, teknologi semikonduktor maupun teknologi polimer.

### 3. Cahaya Tampak

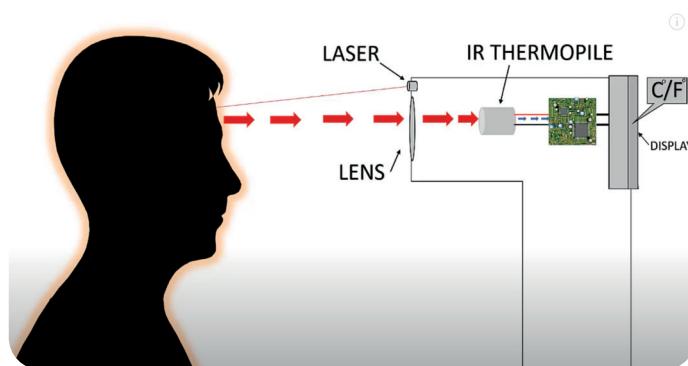
Penggunaan cahaya tampak dalam kehidupan sehari-hari selain untuk membantu melihat juga banyak diaplikasikan dalam bidang kedokteran, kecantikan dan industri. Salah satu yang paling populer adalah sinar laser. Sinar laser digunakan dalam bidang kecantikan untuk meratakan kulit, menghilangkan tato dan bekas jerawat serta untuk terapi lasik pada mata minus. Selain itu sinar laser juga digunakan dalam bidang kedokteran seperti untuk menghancurkan batu ginjal, empedu atau tumor.

### 4. Inframerah

Saat ini pemanfaatan sinar inframerah selain digunakan pada *remote control* juga digunakan pada alat pendekripsi suhu tanpa harus menyentuh orang yang akan diukur suhunya. Termometer inframerah menjadi sangat populer ketika masa pandemi Covid19 ketika setiap orang satu sama lain tidak boleh bersentuhan. Termometer inframerah cukup diarahkan pada jarak tertentu, tanpa harus disentuhkan untuk mengukur suhu tubuh manusia. Prinsip kerjanya memanfaatkan fakta bahwa setiap orang akan memancarkan radiasi inframerah karena suhunya di atas 0K (nol Kelvin). Radiasi yang inframerah yang dipancarkan seseorang akan dikumpulkan oleh lensa menuju sensor yang disebut *thermopile*, kemudian diolah menjadi data digital dan ditampilkan pada layar sebagai suhu yang terbaca.



Gambar 5.8 Layar hasil kamera Infra merah  
Sumber: Jung Yeon Je/nbcnews.com(2009)



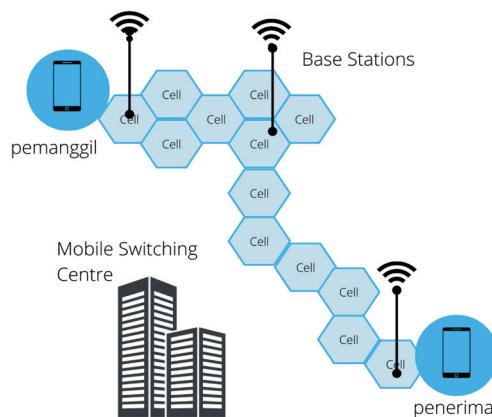
Gambar 5.9 Prinsip kerja termometer inframerah  
Sumber : Mansi/BeingWell (2022)

Termometer inframerah yang digunakan di pusat perbelanjaan modern atau bandara, biasanya berupa kamera. Contoh Gambar 5.8 menunjukkan layar yang menampilkan suhu beberapa orang di dalam gedung menggunakan kamera pendeksi suhu.

## 5. Gelombang Mikro

### a. Telepon Seluler

Gelombang mikro banyak dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari seperti pada *microwave oven*. Frekuensi yang digunakan lebih rendah, antara gelombang mikro dan gelombang radio yaitu pada frekuensi 450 – 1800 MHz. Gelombang mikro juga dimanfaatkan untuk alat telekomunikasi modern telepon seluler yang prinsip kerjanya dapat dilihat pada Gambar 5.10.

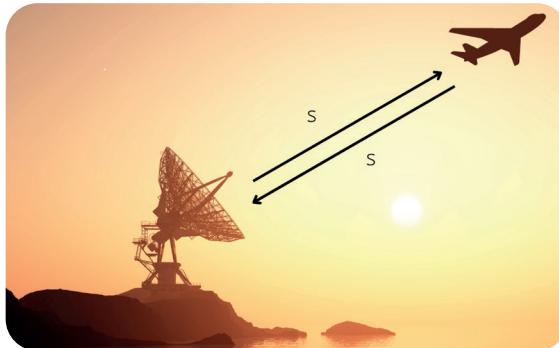


Gambar 5. 10 Prinsip kerja telefon seluler  
sumber: Nevit Dilmen/Wikimedia Commons(2011)

Setiap area layanan dibagi dalam wilayah kecil yang disebut *cells* (sel). Masing-masing sel memiliki antena yang dikontrol oleh Base Station dan setiap *Base Station* dikontrol dengan sebuah *Mobile Switching Centre* (MSC). Saat ponsel melakukan panggilan, gelombang elektromagnetik diteruskan dari ponsel pemanggil ke *Base Traveler Stations* (BTS) terdekat kemudian ke MSC yang kemudian diteruskan lagi ke BTS lain sampai ke penerima.

### b. Radar

*Radio detection and ranging* (radar) merupakan salah satu aplikasi gelombang mikro yang pada umumnya digunakan untuk mengukur jarak, sudut dan kecepatan objek. Radar bisa digunakan untuk mendekksi pesawat, mengukur kedalaman laut bahkan digunakan sebagai alat untuk mendekksi laju mobil yang sedang bergerak.



Gambar 5. 11 Radar pendeteksi jarak pesawat

Sumber: Unknown/Canva.edu(2022)

Radar untuk mendeteksi sebuah pesawat akan mengirimkan gelombang mikro ke arah pesawat. Kemudian pesawat akan memantulkan kembali gelombang tersebut. Beda waktu antara sinyal gelombang yang diberikan dan dipantulkan menghasilkan jarak pesawat dengan persamaan :

$$S = \frac{1}{2} v \times t \quad (5-6)$$

dengan  $s$  adalah jarak pesawat,  $t$  adalah waktu yang diperlukan oleh gelombang mikro mulai dipancarkan sampai kembali lagi dan  $v$  adalah laju gelombang mikro, yaitu  $3 \times 10^8$  m/s. Tanda setengah karena waktu yg ditempuh merupakan waktu saat dipancarkan hingga kembali karena dipantulkan.

## 6. Gelombang Radio

Gelombang radio selain digunakan sebagai media komunikasi juga dimanfaatkan dalam teleskop radio. Tahun 1957, Grote Reber (1911-2002) menemukan bahwa matahari memancarkan gelombang radio seperti bintang yang lainnya. Spektrum ini tidak dapat dilihat dengan teleskop optik. Reber membuat **teleskop radio** pertama yang digunakan untuk mengamati spektrum ini. Informasi yang diterima oleh teleskop ini berupa angka yang menunjukkan intensitas dengan panjang gelombang berbeda. Pada teleskop radio modern, informasi angka ini diubah oleh komputer menjadi sebuah gambar sehingga mudah dianalisis.

Teleskop radio juga difungsikan sebagai teleskop radar untuk mengamati benda-benda langit yang jaraknya dekat dengan Bumi seperti Bulan, Mars, Merkurius dan Venus. Sinyal radio dikirim ke permukaan benda langit tersebut, kemudian dipantulkan kembali. Berdasarkan sinyal pantulan ini, digunakan untuk memetakan permukaan benda langit tersebut. Prinsip kerja ini menjadi solusi kelemahan dari teleskop optik yang tidak mampu

mengamati permukaan benda langit akibat awan gas dan debu atau nebulosa di antariksa.

Selain dengan teleskop radio yang ditempatkan di Bumi, observasi benda-benda langit juga dilakukan melalui teleskop yang mengorbit di luar angkasa. Ide mengorbitkan teleskop ke luar angkasa muncul agar dapat melakukan pengamatan benda-benda langit tanpa terhalang atmosfer Bumi. Hal ini karena gelombang elektromagnetik ternyata sebagian besar terhalang oleh atmosfer Bumi dan tidak sampai ke permukaan Bumi.



Gambar 5. 12 Teleskop Hubble antariksa  
Sumber : NASA/ Wikimedia Commons (1990)

Teleskop paling terkenal yang mengorbit bumi diluncurkan pada tahun 1990 yaitu teleskop Hubble. Teleskop Hubble dapat mengamati radiasi gelombang elektromagnetik pada panjang gelombang ultraviolet, cahaya tampak, dan inframerah. Teleskop ini juga dapat menganalisis spektrum cahaya untuk mendapatkan informasi suhu, komposisi, dan jarak dari sebuah bintang dan galaksi.



#### 5.4 Ayo, Cek Pemahaman!

1. Sinar ultraviolet memiliki manfaat tapi juga berbahaya jika terpapar secara berlebihan. Jelaskan bahaya dan manfaat sinar ultraviolet tersebut!
2. Sebuah antena radar mengirimkan sinyal gelombang elektromagnet ke sebuah pesawat yang melintas dan menerima kembali sinyal pantulannya setelah  $2 \times 10^{-4}$  sekon. Tentukan jarak pesawat terhadap antena radar tersebut!
3. Apa kelebihan teleskop radio dibandingkan dengan teleskop optik?

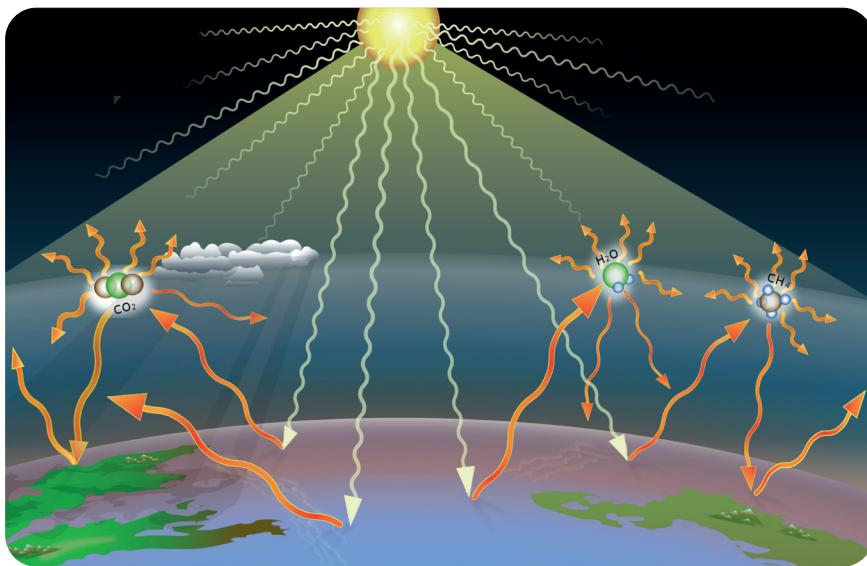


#### Aktivitas 5.5. Literasi

## Pemanasan Global

Radiasi elektromagnetik yang dipancarkan Matahari terdiri dari ultraviolet antara 7 - 8%, cahaya tampak 43% dan inframerah 49 – 50%. Adanya atmosfer Bumi, radiasi yang dipancarkan Matahari sebagian besar dipantulkan

kembali ke ruang angkasa sehingga tidak sampai ke permukaan Bumi seratus persen.



Gambar 5. 13 Efek rumah kaca  
Sumber : Own Work / Wikimedia Commons (2019)

Radiasi yang paling dominan diteruskan ke permukaan Bumi adalah cahaya tampak. Cahaya tampak ini memanaskan permukaan Bumi dan karenanya permukaan Bumi memancarkan radiasi inframerah. Karena gas-gas rumah kaca di atmosfer seperti karbondioksida, radiasi inframerah yang diemisikan permukaan Bumi tidak seluruhnya dipancarkan kembali ke luar atmosfer tapi dipantulkan kembali ke permukaan Bumi dan menjadikan Bumi tetap hangat.

Gas-gas rumah kaca jika terlalu berlebihan, jumlah radiasi inframerah yang terperangkap menjadi lebih besar sehingga menyebabkan suhu Bumi lebih tinggi dari kondisi normal, mengalami kenaikan suhu terus menerus dan memperburuk terjadinya pemanasan global. Akibat pemanasan global ini menyebabkan perubahan curah hujan sehingga badai lebih sering terjadi, perubahan iklim, kenaikan permukaan air laut, mencairnya es di kutub utara, kebakaran hutan dan kenaikan suhu Bumi yang menyebabkan kekeringan serta berbagai penyakit akibat cuaca panas.

#### Diskusikan dan jawab pertanyaan berikut:

1. Berdasarkan tabel, buatlah kesimpulan mengenai energi radiasi sinar matahari.
2. Jelaskan kembali bagaimana proses terjadinya pemanasan global.

- Berdasarkan bacaan, buatlah 2 pertanyaan berbeda terkait tema yang disajikan. Berikan pertanyaan tersebut kepada temanmu untuk dijawab olehnya!
- Upaya apa saja yang dapat mengurangi pemanasan global.

### Rangkuman

- Gelombang elektromagnetik merupakan perambatan medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus dengan arah perambatannya.
- Spektrum gelombang elektromagnetik dari frekuensi tertinggi terdiri dari sinar gamma, sinar X, sinar ultraviolet, cahaya tampak, infra merah, gelombang mikro dan radio.
- Laju gelombang elektromagnetik di ruang vakum sama dengan lajunya di udara sebesar  $3 \times 10^8$  m/s.
- Di udara atau ruang hampa, hubungan medan listrik dan medan magnet adalah  $\frac{E}{B} = c$

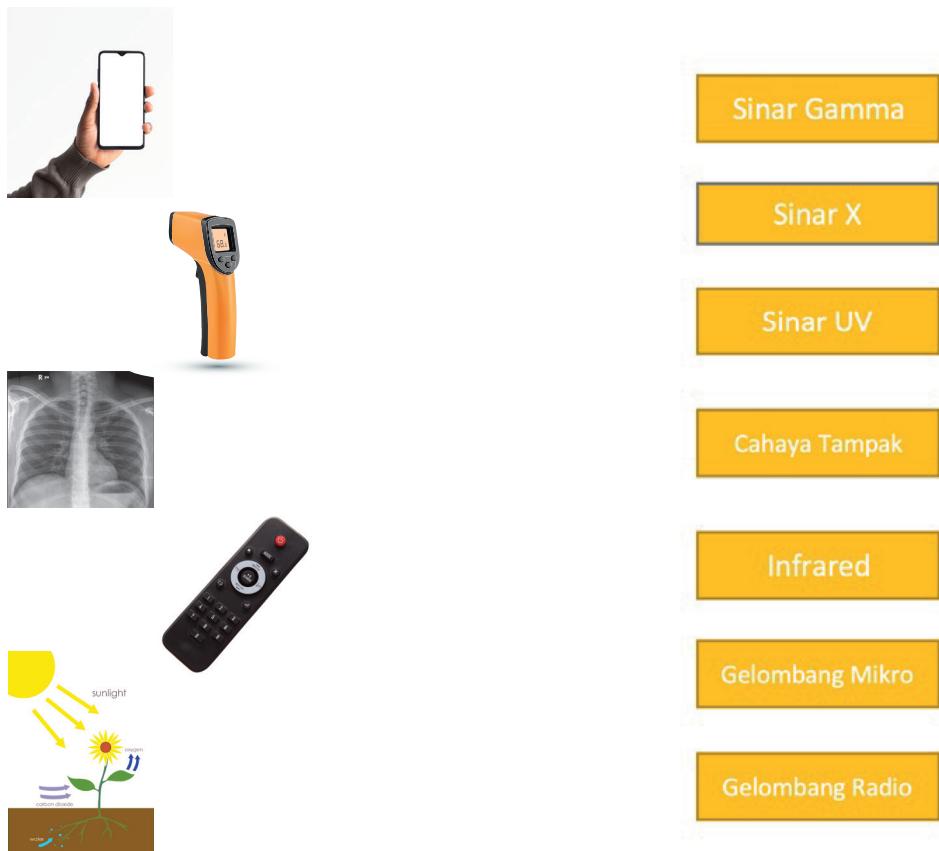
### Asesmen

- Tujuh jenis spektrum gelombang elektromagnetik digambarkan dengan diagram blok dengan cahaya tampak ditunjukkan pada nomor D panjang gelombangnya 500 nm.

A	B	C	D	E	F	G
---	---	---	---	---	---	---

Tentukan :

- jenis gelombang A, B, C, D, E, F, G, H
  - frekuensi gelombang cahaya tampak
- Produk elektronik di bawah ini memanfaatkan gelombang elektromagnetik. Buat tanda panah yang sesuai antara produk teknologi dengan jenis gelombangnya.



3. Sebuah antena radar di bandara mengirimkan sinyal gelombang elektromagnetik mendeteksi keberadaan pesawat yang berada pada jarak 20 km dari bandara. Tentukan waktu yang dibutuhkan sinyal tersebut sampai mengenai pesawat.
4. Seseorang melakukan panggilan telepon seluler ke penerima yang berada di dalam mobil dengan perambatan gelombang elektromagnetik yang memiliki medan magnet efektif sebesar  $2 \times 10^{-10}$  T. Gelombang melewati jendela terbuka yang luasnya 0,20 m<sup>2</sup> secara tegak lurus. Berapa banyak energi yang dibawa gelombang ini melalui jendela selama panggilan telepon 45 detik?

### Pengayaan

Gelombang mikro yang berfrekuensi lebih tinggi dari gelombang yang digunakan telepon seluler digunakan untuk menghasilkan gelombang panas. Gelombang ini digunakan pada oven *microwave* untuk memasak. Oven *microwave* disebut sebagai pemanas pintar karena kemampuannya yang mampu memanaskan makanan tanpa memanaskan wadahnya. Selain itu, gelombang mikro juga digunakan pada bidang kedokteran untuk terapi jaringan tumor. Coba eksplorasi lebih lanjut bagaimana prinsip kerja pemanfaatan gelombang mikro pada oven *microwave* dan terapi tumor ini.

### Refleksi

Setelah kalian mempelajari Bab 5 Gelombang Elektromagnetik:

1. Hal apa yang menarik menurut kalian pada bab ini?
2. Apakah manfaat dan kerugian gelombang elektromagnetik dalam kehidupan sehari-hari?
3. Apakah kalian sudah memahami konsep-konsep esensial pada materi gelombang elektromagnetik?
4. Strategi apa yang dapat kalian lakukan untuk lebih memahami materi gelombang elektromagnetik?

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI  
REPUBLIK INDONESIA 2022

Fisika untuk SMA/MA Kelas XII

Penulis : Irma Rahma Suwarma, Lia Laela Sarah

ISBN : 978-623-472-722-7 (jil.2)

Sumber: teksomolika/freepik (2022)

# BAB 6

## PENGANTAR

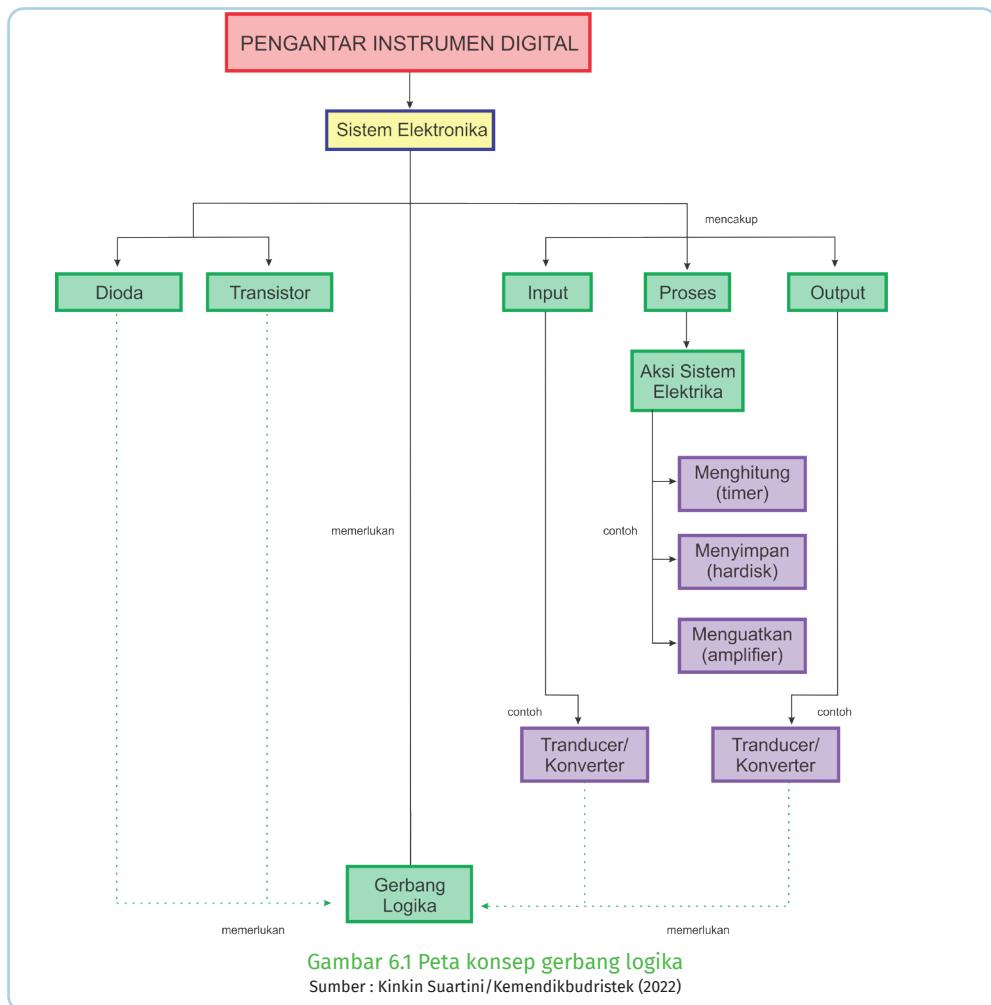
## INSTRUMENTAL DIGITAL

### Kata Kunci

Sistem elektronika • Semikonduktor • Gerbang logika • ‘AND’, ‘OR’, ‘NOR’, ‘NAND’

### Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, kalian dapat memahami, menghitung dan menggunakan konsep gerbang logika ('AND', 'OR', 'NOR', dan 'NAND') sebagai dasar operasi digital sistem elektronik yang menggunakan bahan semikonduktor.



**Gambar 6.2 IC komputer**  
Sumber : Amfell/ Wikimedia Commons (2020)

Ketika kalian melihat bagian dalam komputer, laptop, *handphone* dan alat elektronik lainnya, kalian akan menemukan suatu alat kecil yang memiliki peranan penting dalam proses pemakaian alat tersebut, contoh Gambar 6.2 menunjukkan *Integrated Circuit* (IC) atau sirkuit terpadu yang digunakan dalam salah satu komputer sebagai otak

dari sistem operasi digitalnya. Sistem digital yang digunakan dalam alat-alat elektronik tersebut menggunakan prinsip **gerbang logika** yang mengatur proses *input* dan *output* sehingga bekerja sesuai perintah yang diinginkan.



### Ayo, Bernalar Kritis!

Bagaimana suatu sistem elektronika bekerja? Apa yang menentukan suatu sistem elektronika dapat bekerja dengan baik? Apa saja contoh-contoh komponen yang terdapat dalam sistem elektronika?

## A. Sistem Elektronika

Penggunaan elektronik di rumah, pabrik, kantor, sekolah, bank, toko, dan rumah sakit terus berkembang. Pengembangan perangkat semikonduktor seperti transistor dan *integrated circuit / IC* (sirkuit terpadu) atau ‘chip’ juga telah berkembang, antara lain, mesin perbankan otomatis, komputer laptop, perangkat kontrol yang dapat diprogram, robot, permainan komputer, kamera digital dan alat pacu jantung. Secara garis besar alat-alat elektronik tersebut memiliki suatu sistem elektronika yang terdiri dari input-proses-output. (**Gambar 6.3**)



**Gambar 6.3** Bagan sistem elektronika  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

Bagian input biasanya berupa sensor atau transduser atau *converter* yang berfungsi untuk mengubah masukan (input) non-listrik menjadi sinyal listrik atau sebaliknya. Sensor input mendeteksi perubahan di lingkungan dan mengubahnya dari wujud energi yang dimiliki lingkungan menjadi energi listrik. Contoh sensor input atau transduser antara lain *Light Dependent Resistor/LDR* (resistor yang bergantung pada cahaya), termistor, mikrofon, dan sakelar yang misalnya merespons terhadap perubahan tekanan.

Bagian proses biasanya berupa prosesor memutuskan tindakan apa yang harus diambil pada sinyal listrik yang diterimanya dari sensor input. Proses ini dapat melibatkan operasi seperti menghitung, memperkuat, mengatur waktu atau menyimpan.

Bagian luaran (*output*) biasanya berupa transduser (luaran) mengubah energi listrik yang disuplai oleh prosesor menjadi bentuk lain. Contoh transduser keluaran antara lain lampu, LED (*light-emitting diodes*), pengeras suara, motor, pemanas, relai, dan tabung sinar katoda.

Contoh aplikasi:

Pada pesawat radio, sensor input adalah antena yang mengirimkan sinyal listrik ke prosesor di radio. Prosesor ini, antara lain, memperkuat sinyal sehingga memungkinkan transduser keluaran, dalam hal ini pengeras suara, untuk menghasilkan suara.



### Aktivitas 6.1

Cermati penjelasan dari setiap gambar komponen elektronika yang disajikan pada teks di bawah, kemudian **berikan pendapatmu, apakah komponen tersebut termasuk ke dalam kelompok transduser (*input*), proses (*processor*), transduser(*output*)**.

#### Komponen elektronika:

##### ***Light-Dependent Resistor (LDR)***

Cara kerja LDR didasarkan pada resistansi semikonduktor kadmium sulfida yang berkurang seiring dengan meningkatnya intensitas cahaya yang datang padanya. Ketika cahaya dari lampu jatuh pada ‘jendela’ LDR, maka resistansinya berkurang sehingga arus meningkat (ingat kembali konsep hambatan pada bab sebelumnya) dan menyalakan lampu.



Gambar 6. 4 LDR

Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

#### **Pendapatmu**

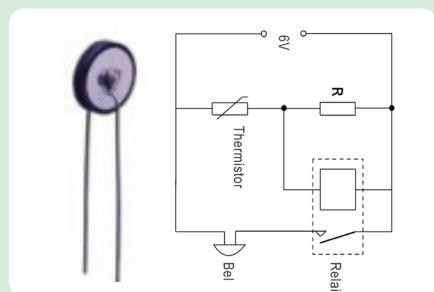
Pilih salah satu

- Transduser (*input*)
- Prosesor
- Transduser (*output*)

Alasan: \_\_\_\_\_

## Termistor

Termistor mengandung oksida logam semikonduktor yang resistansinya menurun tajam ketika suhu naik. Temperatur dapat naik baik karena termistor dipanaskan secara langsung maupun karena ada arus di dalamnya. Jika termostat dirangkai seri dengan hambatan ( $R$ ), maka dapat menghasilnya sinyal bagi transistor atau rangkaian *switching* lainnya sehingga dapat digunakan sebagai pengganti relai.



Gambar 6.5 Termistor dan rangkaianya pada bel

Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistik (2022)

### Pendapatmu

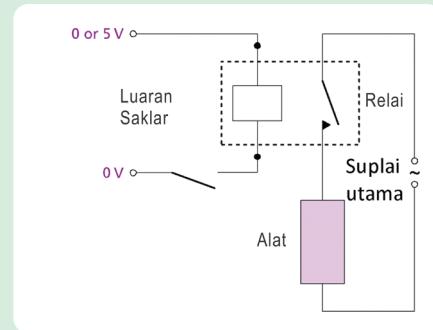
Pilih salah satu

- Transduser (input)
- Prosesor
- Transduser (output)

Alasan: \_\_\_\_\_

## Relay

Rangkaian sakelar tidak dapat memasok banyak daya ke alat sehingga relay sering digunakan. Penggunaan relay dapat memungkinkan arus kecil yang disediakan oleh rangkaian sakelar untuk mengontrol arus yang lebih besar yang diperlukan untuk mengoperasikan bel seperti pada sakelar yang dioperasikan dengan suhu atau perangkat lain. Relay yang dikendalikan oleh rangkaian sakelar juga dapat digunakan untuk memberikan pasokan listrik untuk peralatan listrik di rumah. Pada Gambar 6.6 jika *output* dari rangkaian pensaklaran adalah ‘tinggi’ (5 V), arus kecil akan mengalir ke relay yang menutup sakelar utama; relay juga akan mengisolasi rangkaian tegangan rendah dari suplai listrik tegangan tinggi.



Gambar 6.6 Sistem relay

Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistik (2022)

### Pendapatmu

Pilih salah satu

Transduser (input)

Prosesor

Transduser (output)

Alasan: \_\_\_\_\_

## B. Semikonduktor



Ayo, Bernalar Kritis!

Apa fungsi semikonduktor? Ada berapa jenis semikonduktor? Bagaimana karakteristik setiap jenis semikonduktor tersebut?

### 1. Pengertian Semikonduktor

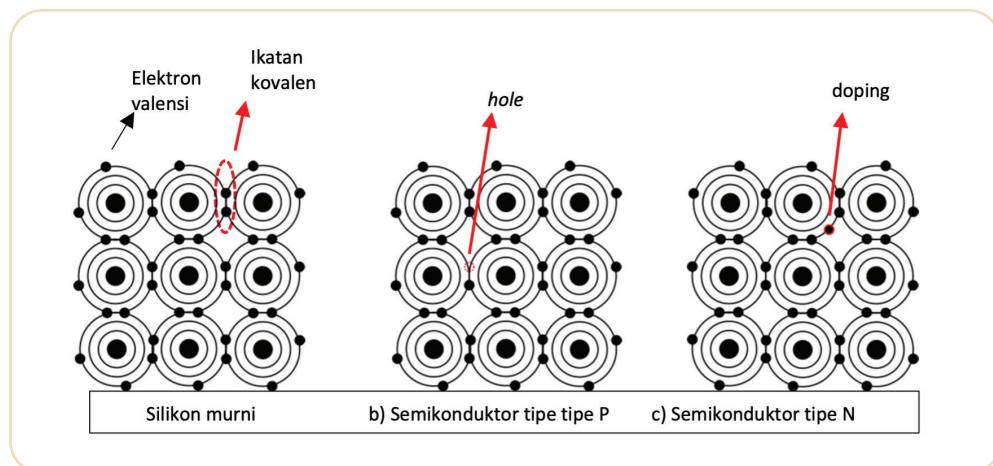
Masih ingatkah kalian dengan konsep penghantar arus listrik?. Penghantar arus listrik ada yang tergolong pada penghantar listrik yang baik (konduktor), penghantar listrik yang tidak baik (isolator), dan yang dapat berperan sebagai keduanya tergantung pada lingkungannya (dapat bertindak sebagai konduktor dan isolator).

Beberapa bahan seperti germanium (Ge) dan silikon (Si) bukan termasuk konduktor atau isolator yang baik. Bahan-bahan ini mempunyai nilai hambatan jenis di antara nilai hambatan jenis isolator dan konduktor. Dalam bentuk kristal murni, umumnya bahan-bahan ini bersifat isolator. Sedangkan bila terdapat ketidakmurnian pada struktur kristalnya, Bahan yang dapat dibuat untuk berperilaku kadang-kadang sebagai isolator dan kadang-kadang sebagai konduktor disebut **semikonduktor**.

#### Klasifikasi Semikonduktor

Berdasarkan mekanisme terbentuknya gejala semikonduktivitas, semikonduktor terdiri atas semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik. Semikonduktor intrinsik terbentuk dari semikonduktor murni

yang memiliki ikatan kovalen sempurna seperti Silikon (Si), Germanium (Ge), dan *Carbon* / grafit (C). Mekanisme terbentuknya semikonduktor intrinsik diperlihatkan pada semikonduktor murni seperti Si. Pada kondisi normal atom-atom Si saling berikan melalui 4 ikatan kovalen (masing-masing memiliki 4 elektron valensi), perhatikan Gambar 6.7 a).



Gambar 6.7 Semikonduktor  
Sumber : Zmaragdus/ Wikimedia Commons (2019)

Suhu ketika dinaikkan, maka stimulasi panas akan mengganggu ikatan valensi ini sehingga salah satu elektron valensi akan berpindah ke pita konduksi. Lokasi yang ditinggalkan oleh elektron valensi ini akan membentuk hole (lihat Gambar 6.7 b). Pasangan hole dan elektron ini menjadi pembawa muatan dalam semikonduktor intrinsik yang terbentuk dari semikonduktor murni yang dikotori oleh atom doping sebagai penghasil elektron konduksi (lihat Gambar 6.7 c). Atom *doping* ini dimaksudkan untuk mendapatkan elektron valensi bebas dalam jumlah lebih banyak dan permanen sehingga diharapkan akan dapat mengantarkan listrik.

Berdasarkan tipe pembawa muatannya tersebut, semikonduktor dibagi menjadi dua tipe yaitu tipe N (Silikon + Phosphor atau Arsenic) dan tipe P (Silikon + Boron, Galium atau Indium).



#### Aktivitas 6.2

Cermati teks penjelasan jenis-jenis semikonduktor, kemudian buatlah **gambar proses perpindahan elektron** pada setiap jenis semikonduktor tersebut.

Jenis Semikonduktor
<b>Semikonduktor tipe-N</b>
Sebuah silikon diberi pengotor posfor atau arsenik, yaitu bahan kristal dengan inti atom memiliki 5 elektron valensi, sehingga memberikan kelebihan elektron. Atom posfor ini disebut sebagai donatur.
<b>Semikonduktor tipe-P</b>
Sebuah silikon diberi pengotor boron yang memiliki 3 elektron pada pita valensi. Karena ion silikon memiliki 4 elektron pada pita valensi, maka ada lubang ( <i>hole</i> ) yang perlu diisi oleh electron dan <i>hole</i> ini siap untuk menerima elektron. Sehingga disebut juga sebagai akseptor.

Berdasarkan teks dan gambaranmu di atas, tuliskan pemahamanmu mengenai semikonduktor tipe-P dan tipe-N

## 2. Penggunaan Semikonduktor



Ayo, Bernalar Kritis!

Tahukah kalian penggunaan semikonduktor dalam kehidupan sehari-hari? Seberapa besarkah manfaatnya bagi kehidupan kita? Apakah semikonduktor memiliki efek samping yang membahayakan bagi Kesehatan kita?

Semikonduktor dapat dikatakan menjadi bahan dasar bagi perangkat teknologi modern. Sadar atau tidak, perangkat elektronik yang kalian pakai seperti komputer atau *smartphone* disusun dari komponen berbahan dasar semikonduktor. Contoh komponen semikonduktor ini digunakan sebagai bahan pembentuk dioda dan transistor.

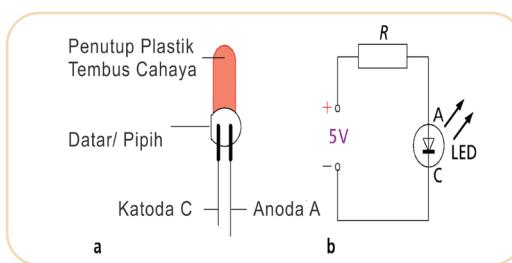
Kalian akan menemukan dua buah kutub yang saling berlawanan pada dioda. Salah satu sisi merupakan kutub bermuatan positif (anoda) dan sisi lainnya merupakan kutub bermuatan negatif (katoda). Dengan demikian, dioda dapat digunakan untuk dua fungsi sekaligus. Misalnya, pada satu sisi dapat digunakan sebagai penyearah arus dan sisi lainnya dapat digunakan sebagai penghambat arus listrik. Salah satu jenis dioda yang memiliki dua fungsi tersebut adalah LED dan kalian sudah menggunakannya pada Bab 1.

## a. Light-Emitting Diode (LED)

Prinsip kerja LED adalah kebalikan dari sel surya. Prinsip kerja pada sel surya, cahaya dikumpulkan untuk menghasilkan tegangan listrik. Prinsip kerja pada LED, tegangan atau arus listrik digunakan untuk menghasilkan emisi cahaya. LED pertama yang dikembangkan pada 1960-an menghasilkan lampu merah sebagai indikator di berbagai panel instrumen saat itu. LED dapat memberi tahu apakah sebuah alat elektronik mati atau hidup. LED yang memancarkan berbagai warna dikembangkan pada 1990-an. Saat ini, LED telah berkembang tidak terbatas hanya sebagai tampilan indikator peralatan elektronik, tapi juga digunakan pada lampu lalu lintas, lampu rem mobil, penerangan landasan pacu bandara, lampu peringatan di menara transmisi TV, bahkan pada papan reklame.



Gambar 6.8 Contoh penggunaan LED  
Sumber : Chris Rider/ Wikimedia Commons (2022)



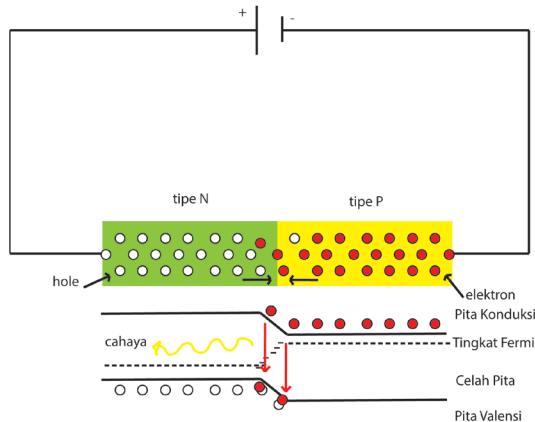
Gambar 6.9 a.LED, b.Rangkaian LED  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistik (2022)

LED sangat handal dan efisien, tidak memerlukan filamen, tahan lama (sekitar 100 kali lebih lama dari lampu pijar) dan tidak mengandung merkuri berbahaya.

LED yang ditunjukkan pada Gambar 6.9 adalah dioda yang terbuat dari semikonduktor gallium arsenida fosfida. Saat panjar maju (kaki katoda C terhubung ke terminal negatif dari sumber tegangan, LED akan memancarkan cahaya. Namun pada panjar mundur (ketika anoda A terhubung ke terminal negatif dari sumber tegangan), LED tidak memancarkan cahaya. Jika LED diberi tegangan panjang mundur melebihi 5 V maka LED tersebut dapat mengalami kerusakan.

LED dalam penggunaannya dirangkai secara seri dengan resistor R, misalnya resistor  $300\ \Omega$  pada tegangan 5V untuk membatasi arus listriknya (biasanya 10 mA) perhatikan Gambar 6.9.b.

Sebuah LED pada dasarnya terdiri dari lapisan kombinasi semikonduktor tipe-N dan semikonduktor tipe P. Secara garis besar proses LED menghasilkan cahaya ketika diberi tegangan pada panjar maju terlihat pada Gambar 6.10.



Gambar 6. 10. Prinsip kerja LED  
Sumber: Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

LED sebelum diberi tegangan panjar maju, elektron pada bagian semikonduktor tipe-P yang berada di pita konduksi tidak mampu melewati celah pita. Saat diode diberi tegangan panjar maju, elektron akan mendapatkan energi potensial listrik sehingga mampu berpindah dari pita konduksi melewati celah pita menuju pita valensi dan jatuh ke dalam hole. Elektron ketika bertemu dengan hole akan kehilangan energi potensial listriknya. Penurunan energi potensial elektron ini berubah menjadi kuanta cahaya yang disebut foton (penjelasan mengenai foton akan dibahas pada Bab 8).

Unsur-unsur yang digunakan dalam pembuatan LED menentukan besar energi hole dan warna foton yang dipancarkan. Penurunan energi yang lebih besar melepaskan cahaya lebih dekat ke biru, sedangkan penurunan energi yang lebih rendah melepaskan cahaya ke arah merah.

### b. Transistor



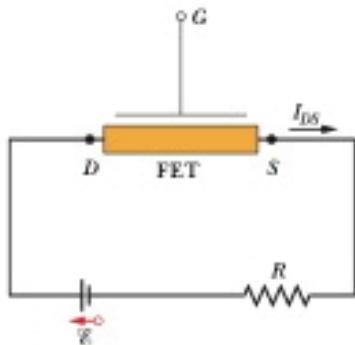
Gambar 6. 11 Transistor  
sumber: unknown/skemaku(2022)

Transistor adalah komponen elektronik yang dibuat dari material semikonduktor untuk mengatur tegangan dan arus yang mengalir melewatkinya. Fungsi transistor bermacam-macam, tidak hanya sebagai sakelar, tapi juga dapat berfungsi sebagai penguat arus dan penguat amplifier sinyal.

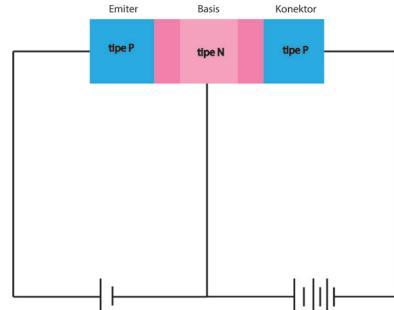
Jenis transistor secara umum dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu *Bipolar Junction Transistor / BJT* (transistor bipolar) dan *Junction Field Effect Transistor /JFET* (transistor efek medan). Transistor bipolar terdiri dari transistor PNP dan transistor NPN. Gambar 6.12 menunjukkan transistor

PNP yang dihubungkan dengan dua baterai  $V_E$  dan  $V_C$ . Tegangan yang digunakan pada *Collector* biasanya lebih besar dari tegangan *Emitter*.

Transistor FET ditunjukkan dengan Gambar 6.14, di dalamnya aliran elektron dari terminal S (source/sumber) ke kiri melalui daerah yang diarsir ke terminal D (drain/saluran) dapat dikontrol oleh medan listrik (karenanya disebut efek medan) yang diatur di dalam perangkat dengan potensial listrik yang sesuai yang diterapkan ke terminal G (gate/gerbang). Transistor FET juga tersedia dalam berbagai jenis, tapi yang banyak digunakan dalam teknologi elektronik modern adalah MOSFET (*Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) atau transistor efek medan semikonduktor oksida logam. *MOSFET* merupakan transistor.

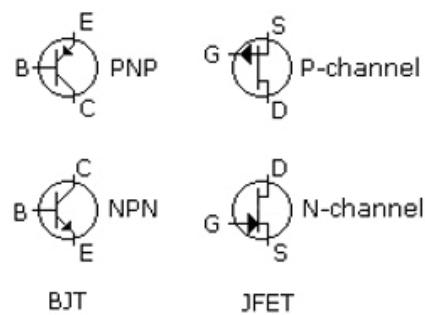


Gambar 6.14 Contoh rangkaian transistor FET



Gambar 6.12 Transistor bipolar PNP

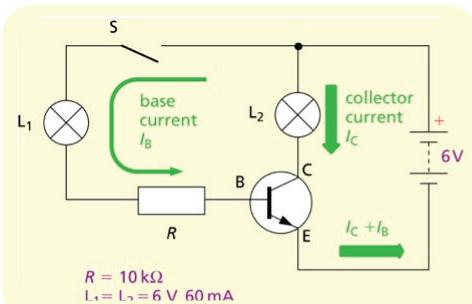
Sumber: Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



Gambar 6.13 Simbol transistor

Sumber: Omegatron/Wikimedia Commons (2005)

Semua transistor memiliki tiga koneksi. Pada transistor bipolar disebut *Base* (B), *Collector* (C) dan *Emitter* (E), sedangkan pada FET disebut *Drain* (D), *Source* (S) dan *Gate / G* (Gerbang). Simbol transistor yang ditunjukkan Gambar 6.13, panah menunjukkan arah arus konvensional yang mengalir di dalamnya. Gambar 6.14 menunjukkan contoh rangkaian transistor yang memiliki *FET* (*Field Effect Transistor*). Pada rangkaian tersebut, elektron mengalir dari terminal sumber S ke terminal pembuangan D ( $I_{DS}$  arus konvensional berada pada arah yang berlawanan.) Besarnya  $I_{DS}$  dikendalikan medan

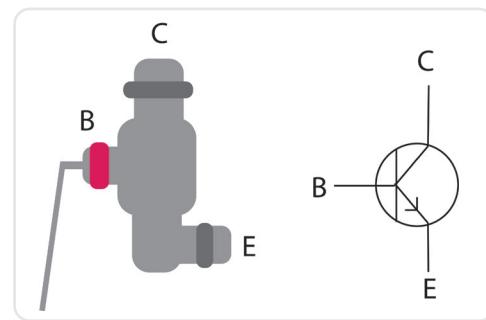


Gambar 6.15 Cara kerja transistor

Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistik (2022)

listrik yang dikendalikan di dalam *FET* oleh potensial di terminal gerbang G. Secara garis besar, prinsip kerja transistor dalam rangkaian terlihat pada Gambar 6.15.

Saat sakelar S terbuka, arus basis  $I_B$  adalah nol, arus kolektor  $I_C$  juga nol, meskipun lampu L2 terlihat membentuk rangkaian tertutup melintasi C E sehingga lampu L1 dan L2 tidak menyala. Saat sakelar S tertutup, terdapat aliran arus pada basis  $I_B$  dan kolektor IC, meskipun arus basis  $I_B$  jauh lebih kecil dari arus kolektor  $I_C$ . Akibat aliran arus ini, lampu L2 menyala, tapi L1 tetap tidak menyala. Arus basis  $I_B$  disini berfungsi sebagai pengontrol dari arus kolektor  $I_C$ . Jika diibaratkan dengan aliran air pada pipa, maka arus basis  $I_B$  berperan sebagai keran yang akan mengontrol jalannya air pada pipa (Gambar 6.16).



Gambar 6. 16 Analogi transistor dengan keran air  
Sumber : Nanda Autiarahma/Kemendikburistek (2022)

### c. Sirkuit Terpadu (Integrated Circuit / IC)

Gabungan ratusan bahkan jutaan transistor, dioda, resistor dan kapasitor saat ini dijadikan satu pada sebuah *microchip* berukuran sangat kecil (sentimeter) yang disebut sirkuit terpadu atau *Integrated Circuit* (IC) (Gambar 6.17). Komponen-komponen ini diperkecil dan digabungkan sedemikain rupa sehingga dapat melakukan berbagai tugas serta perhitungan. IC merupakan komponen dasar sistem kerja berbagai alat teknologi modern termasuk komputer, *smartphone*, jam digital, dan alat elektronik yang menggunakan sistem pemrograman.



Gambar 6. 17 Contoh Integrated Circuit (AC)  
Sumber : Raimond / Wikimedia Commons (2019)

Bahan utama yang membentuk sebuah *Integrated Circuit* (IC) adalah bahan semikonduktor, umumnya Silikon (Si) yang telah diberi ketidakmurnian. Berdasarkan sinyal *input*-nya, ada dua jenis IC, yaitu IC *digital* dan IC *analog*.

Cara kerja IC digital adalah dengan menerapkan prinsip gerbang logika yang bekerja menggunakan *input* nilai 0 dan 1. Nilai 0 untuk sinyal rendah (Off) dan nilai 1 untuk sinyal tinggi (On). Sirkuit yang terdiri dari dua *input* biasa disebut sirkuit biner. IC digital memiliki jutaan sistem *flip flop*, gerbang logika dan lainnya dalam satu *chip* kecil. Contoh penggunaan IC digital adalah mikrokontroler dan mikroprosesor.

Cara kerja IC analog adalah dengan menerapkan sinyal kontinu baik *input* maupun *output*-nya. Contoh IC analog digunakan pada mikrofon untuk mengubah gelombang bunyi menjadi sinyal listrik dengan tegangan yang bervariasi. IC analog juga digunakan dalam menguatkan sinyal listrik tersebut dan dikeluarkan melalui speaker.

IC *digital* dan IC *analog* juga sering digabungkan pada satu *chip* sehingga dikenal *mixed-signal* IC. IC jenis campuran ini digunakan pada *converter A/D (Analog to Digital)*, *converter D/A (Digital to Analog)*, potensiometer dan IC *clock*. IC *clock* adalah IC yang berfungsi menghasilkan suatu pulsa teratur untuk menjamin bahwa kode 1 dan 0 dihasilkan pada interval yang teratur. Bagaimana nilai 0 dan 1 sebagai input gerbang logika pada rangkaian elektronik digital?. Perhatikan dan lakukan aktivitas pada subbab C untuk memahaminya.

## C. Prinsip Gerbang Logika



Ayo, Bernalar Kritis!

Bagaimana caranya LED dapat menghasilkan warna sesuai dengan indikator yang kita inginkan? Bagaimana sebuah sensor dapat menentukan apakah masukan yang datang sudah tepat dengan keadaan yang diinginkan?

Gerbang logika dianalogikan sebagai otak suatu barang elektronika untuk menjalankan fungsinya. Gerbang logika didasarkan pada analogi kita dalam menentukan suatu alat elektronika tersebut bekerja, sehingga menjadi bagian penting dalam suatu alat elektronika. Gerbang logika yang berisi perintah-perintah ini digunakan pada rangkaian elektronika digital. Tujuannya adalah untuk mengubah masukan (*input*) menjadi luaran (*output*) sesuai dengan keperluan kita.

Gerbang logika ini akan direpresentasikan dengan angka biner atau tabel kebenaran dengan simbol 1 dan 0. Angka 1 dan 0 itu digunakan untuk

menggambarkan Benar (TRUE) dan salah (FALSE) atau tinggi (HIGH) dan rendah (LOW), serta hidup (ON) dan mati (OFF).

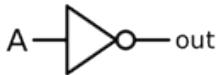
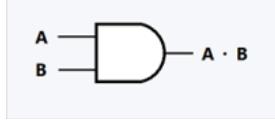
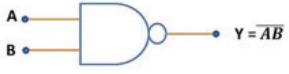
Fungsi utama dari gerbang logika ini adalah untuk menjadi dasar dalam membentuk rangkaian digital agar semua komponen bisa saling berhubungan atau terintegrasi dengan baik. Semakin baik hubungan antar komponen itu, maka barang elektronik juga akan semakin berjalan dengan baik. Gerbang logika ini sebenarnya menjadi suatu sistem yang digunakan untuk menerjemahkan atau memerintah suatu perangkat elektronik untuk beroperasi.

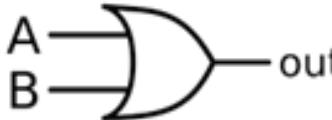


### Aktivitas 6.3

Ayo, cermati jenis-jenis gerbang logika yang dibedakan berdasarkan fungsi dan cara kerjanya. Setiap jenis gerbang logika tersebut memiliki simbol dan tabel kebenaran yang berbeda.

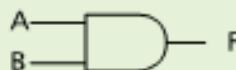
Tabel 6.1 Tabel Kebenaran Gerbang Logika

Jenis	Fungsi dan Cara Kerja
NOT	 <p>Gerbang logika yang paling sederhana karena hanya memerlukan satu masukan (input) dan satu luaran (output) yang memiliki sifat keterbalikan dari inputnya.</p>
AND	 <p>Gerbang logika jenis AND merupakan gerbang logika yang memerlukan dua masukan (input) dan menghasilkan 1 luaran (output), sifatnya seperti logika perkalian. Jika salah satu atau seluruh input bilangan binernya adalah '0', maka hasilnya atau luarannya adalah '0'. Jika input keduanya merupakan bilangan biner '1', maka luaran (output)</p>
NAND	 <p>NAND merupakan gabungan dari gerbang logika AND dan NOT. Cara kerja gerbang logika ini merupakan kebalikan dari cara kerja gerbang logika AND. Jika semua atau salah satu masukan (input) merupakan bilangan '0', maka luaranya (output) adalah 1. Jika semua masukan (input) merupakan bilangan biner 1, maka luaranya (output) adalah '0'.</p>

OR	 <p>Gerbang logika ini memerlukan dua masukan (input) dan menghasilkan satu luaran (output). Cara kerja gerbang logika ini adalah jika salah satu atau semua masukan (input) merupakan bilangan biner '1' maka luarannya (output) adalah '1'. Jika masukannya merupakan bilangan biner '0' maka luarannya adalah '0'. Gerbang logika ini merupakan gerbang logika yang sederhana karena hanya melibatkan resistor dan transistor.</p>
NOR	 <p>NOR merupakan gabungan dari gerbang logika NOT dan OR. Cara kerja gerbang logika NOR berkebalikan dengan gerbang logika OR. Jika salah satu atau semua masukan (input) merupakan bilangan biner '1', maka luarannya (output) adalah 01'. Jika masukannya merupakan bilangan biner '0', maka luarannya adalah '1'.</p>

Berdasarkan jenis-jenis gerbang logika tersebut, buatlah tabel kebenaran yang sesuai dengan cara kerjanya. Contoh untuk gerbang AND terlihat seperti tabel di bawah ini.

AND gate

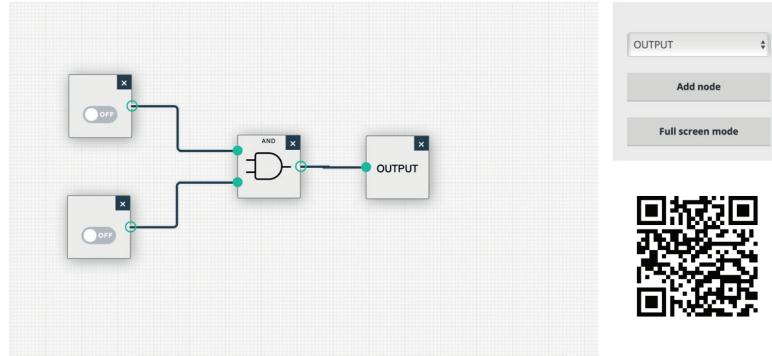


A	B	F
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Gambar 6.18 Contoh gerbang AND

Kalian akan lebih memahami cara kerja gerbang logika tersebut dengan membuat rangkaian gerbang logika melalui simulator gerbang logika pada:

<https://academo.org/demos/logic-gate-simulator/>



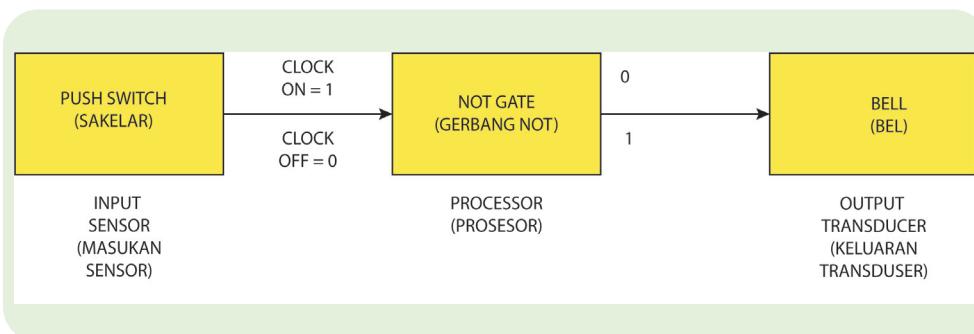
Gambar 6.19 Rangkaian gerbang logika

Sumber: Marco Olgio/academo(2022)

1. Tentukan gerbang logika yang akan disimulasikan.
2. Pilih input, kemudian klik ‘Add node’.
3. Pilih jenis gerbang logika, kemudian klik ‘Add node’.
4. Pilih output, kemudian klik ‘Add node’.
5. Uji cara kerja gerbang logika yang kalian pilih.

Aplikasi gerbang logika dalam rangkaian elektronika telah banyak dikembangkan. Misalnya pada sistem keamanan, sistem keamanan pada mesin operator, pengatur suhu, lampu jalan, dan lain-lain.

Contoh penggunaan gerbang logika pada sistem keamanan adalah dengan menggunakan cara kerja gerbang logika NOT. Sebuah sistem sederhana yang mungkin digunakan oleh toko perhiasan untuk melindungi jam mahal ditunjukkan dalam diagram blok untuk Gambar 6.18. Saat jam disimpan di kotak/tempatnya, saklar akan mengirimkan 1 ke gerbang NOT. Saat jam diambil dari kotak/tempatnya, sinyal 0 dikirim sehingga output dari gerbang NOT adalah 1 dan akan membunyikan bel.



Gambar 6.20 Diagram blok sistem keamanan  
Tom Duncan/IGCSE Physics (2014)



## Ayo, Berpikir Kreatif!

Rancang dan gambar diagram blok untuk sistem gerbang logika agar menunjukkan bagaimana pekerjaan berikut dapat dilakukan. Jika memungkinkan, buatlah menggunakan simulator.

- Atur agar bel pintu hanya berfungsi pada siang hari.
- Nyalakan pemanas kamar mandi saat dingin dan terang.
- Sistem lampu jalan.

Sistem peringatan tentang kondisi dingin di malam hari kepada tukang kebun yang terkadang sangat lelah setelah seharian bekerja keras dan mungkin ingin mematikan alarm.

### Rangkuman

1. Secara garis besar alat-alat elektronik tersebut memiliki suatu sistem elektronika yang terdiri dari input-proses-output.
2. Semikonduktor merupakan perangkat elektronika yang dapat bersifat sebagai konduktor maupun isolator bergantung pada keadaan yang diatur sesuai dengan proses kerjanya.
3. Jenis semikonduktor terdiri dari semikonduktor tipe-p dan semikonduktor tipe-n.
4. Pemanfaatan semikonduktor pada kehidupan sehari-hari telah banyak diterapkan, salah satunya dalam bentuk transistor yang berfungsi untuk mengatur arus dan tegangan.
5. Gerbang logika merupakan bagian penting yang menjadi otak sistem elektronika.
6. Jenis gerbang logika terdiri dari gerbang logika NOT, AND, NAND, OR, dan NOR. Gerbang logika tersebut memiliki fungsi dan cara kerja yang berbeda.

### Asesmen

1. Silikon merupakan unsur penyusun kaca dan juga semikonduktor, tapi sifat fisis gelas dan semikonduktor berbeda. Mengapa hal tersebut terjadi? Berikan penjelasanmu!

- Sebuah LED dibuat dari sambungan p-n berdasarkan bahan semikonduktor Ga-As-P tertentu yang celah energinya 1,9 eV. Berapa panjang gelombang cahaya yang dipancarkan?
- Amati tabel kebenaran untuk gerbang logika A, B, C, dan D berikut:

Input		Outputs			
		A	B	C	D
0	0	0	0	1	1
0	1	0	1	1	0
1	0	0	1	1	0
1	1	1	1	0	0

### Pengayaan



Gambar 6.21 Arduino Uno

Sumber: Sparkfun Elektronik/ Wikimedia Commons (2013)

### Arduino-UNO

Arduino adalah sebuah perangkat teknologi digital pengendali mikro (mikrokontroler) *single-board* yang bersifat *open-source* serta dirancang untuk memudahkan penggunaan elektronik dalam berbagai bidang. Saat

ini, Arduino sangat populer di seluruh dunia. Banyak pemula yang belajar mengenal robotika dan elektronika lewat Arduino karena mudah dipelajari. Sebetulnya tidak hanya pemula, para *hobbyist* atau profesional pun ikut senang mengembangkan aplikasi elektronik menggunakan Arduino. Bahasa yang dipakai dalam Arduino bukan *assembler* yang relatif sulit, tapi bahasa pemrograman C++ yang disederhanakan dengan bantuan pustaka-pustaka (*libraries*) Arduino.

### Refleksi

Setelah mempelajari Bab 6 Pengantar Instrumentasi Digital,

1. Apakah kalian menyadari manfaat semikonduktor dalam kehidupan sehari-hari?
2. Apakah kalian sudah memahami konsep-konsep esensial dari pengantar instrumentasi digital?
3. Apa yang akan kalian lakukan untuk meningkatkan pemahaman mengenai pengantar instrumentasi digital ini?

Arduino juga menyederhanakan proses bekerja dengan mikrokontroler, sekaligus menawarkan berbagai macam kelebihan. Ada beberapa versi papan arduino, salah satu yang paling umum digunakan adalah Arduino UNO. Bentuk rancangan papan arduino UNO dapat dilihat pada **Gambar 6.21**. Arduino memiliki pin digital maupun pin analog dalam satu papan rangkaian. Pin digital dapat digunakan sebagai input output (I/O) sinyal digital (0 dan 1) sedangkan pin analog digunakan untuk membaca sinyal analog seperti sensor kelembaman dan sensor suhu kemudian diubah menjadi nilai digital agar dapat dibaca oleh mikrokontroler. Selain itu pada papan Arduino terlihat tulisan Tx dan Rx, Tx akan berkedip saat Arduino mengirim data serial sedangkan Rx akan berkedip saat menerimanya.

Penggunaan Arduino-UNO dalam kehidupan sehari-hari biasanya ditemukan dalam alarm otomatis, alarm pintu rumah dengan sensor magnet, baca sd card, counter dengan 7 segmen

4 digit, dan lain-lain. Contoh-contoh penggunaan tersebut dapat dijadikan ide projek pembuatan prototype yang dapat kalian coba di rumah. Tentu saja dengan melengkapi penggunaan papan Arduino ditambah dengan komponen lain seperti sensor, kabel jumper, LED, dan lain-lain.

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI  
REPUBLIK INDONESIA 2022

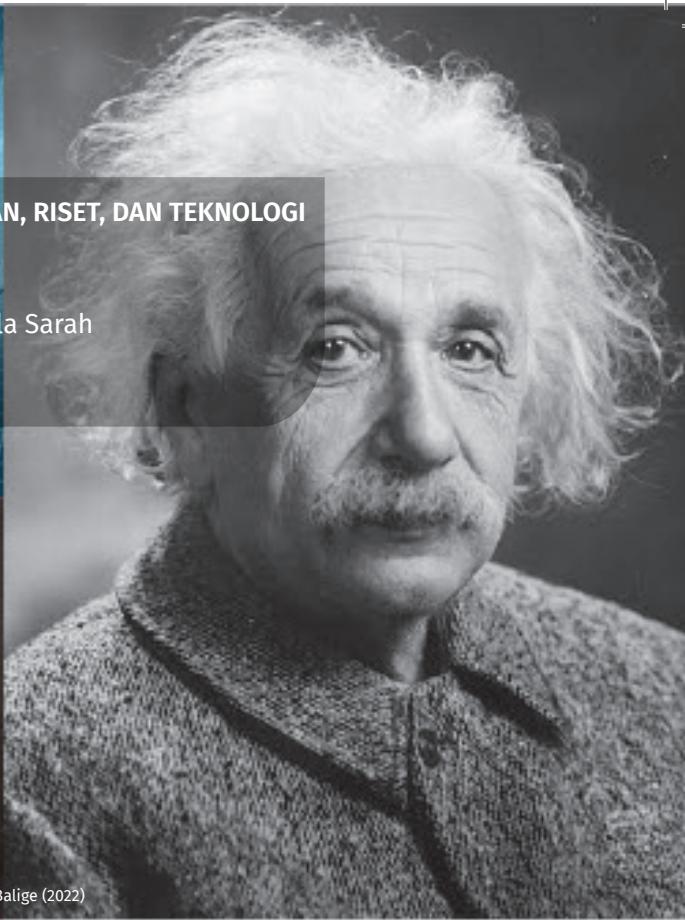
Fisika untuk SMA Kelas XII

Penulis : Irma Rahma Suwarma, Lia Laela Sarah

ISBN : 978-623-472-722-7 (jil.2)

$$E = mc^2$$

public/wikimedia commons, marekuliasz/news18.com, Samuel – Balige (2022)



# BAB 7

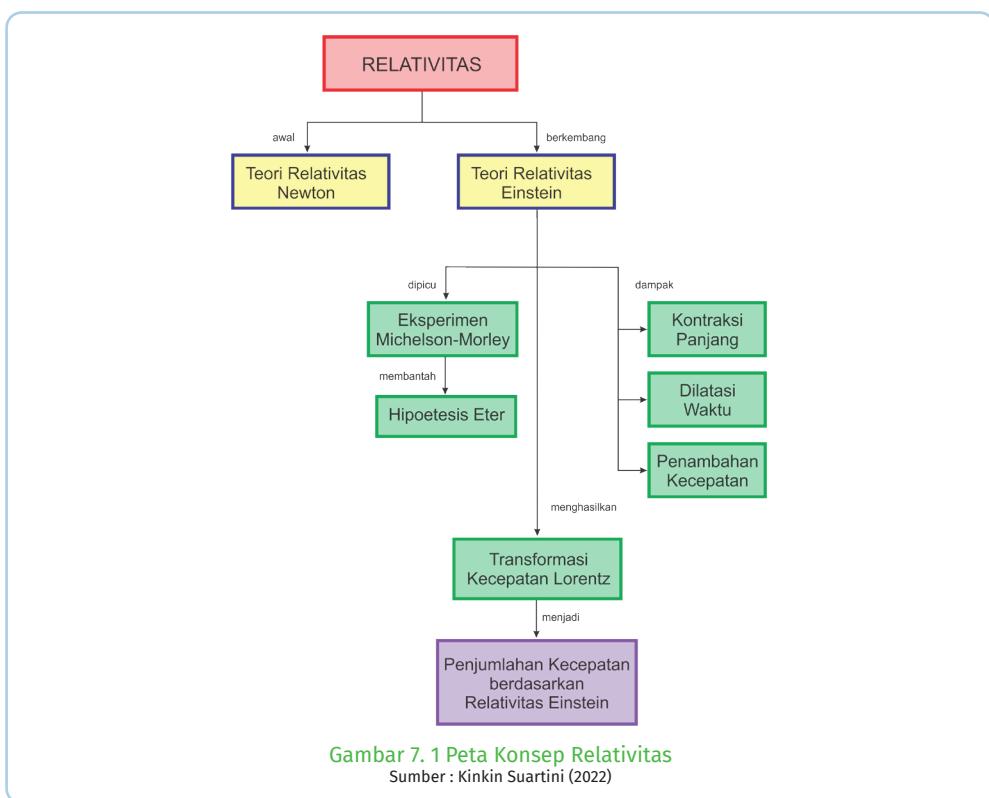
# RELATIVITAS

## Kata Kunci

Sistem elektronika • Semikonduktor • Gerbang logika • ‘AND’, ‘OR’, ‘NOR’, ‘NAND’

### Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab relativitas ini, kalian dapat membedakan fenomena gerak pada suatu kerangka referensi, mengorelasikan postulat Einstein tentang relativitas khusus yang pertama dan kedua mengenai gerak relatif melalui berbagai fenomena dalam kehidupan sehari-hari, dan menganalisis besaran fisis dampak teori relativitas Einstein pada, dilatasasi waktu, penambahan kecepatan, dan pengerutan panjang



## A. Postulat Pertama dan Kedua Einstein

### 1. Gerak Relatif Newton



Ayo, Ingat Kembali!

#### Tahukah kalian?

Teori relativitas Newton mempelajari bagaimana pengukuran besaran fisika yang bergantung pada kerangka acuan dari pengamat. Menurut Newton (1642-1726) menyatakan bahwa suatu benda dikatakan bergerak apabila kedudukan benda tersebut berubah terhadap kerangka acuannya. Kerangka acuan Newton disebut dengan kerangka inersia. Kerangka acuan merupakan tempat dimana benda tersebut bergerak.

**Salah satu contoh gerak relatif** saat seorang pengamat di luar kereta api mengamati bahwa penumpang dalam kereta api diam, sedangkan penumpang di dalam kereta api berasumsi

bahwa dirinya ikut bergerak bersama dengan kereta api tersebut, sehingga munculah gerak **relativitas Newton** yang menyatakan bahwa hukum-hukum mekanika berlaku sama pada semua **kerangka acuan inersial**.

## 2. Relativitas Einstein

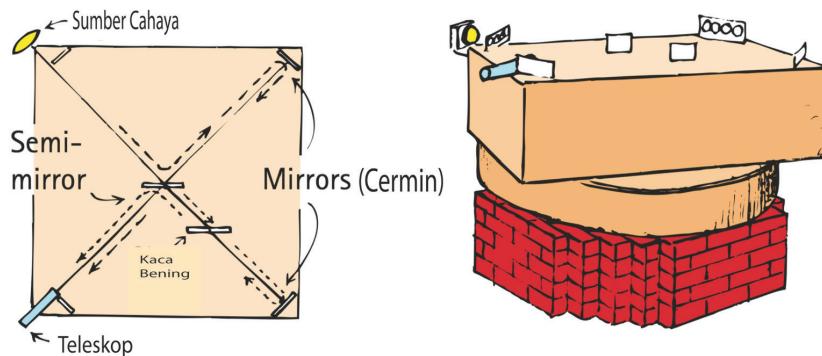


Ayo, Bernalar Kritis!

Jika Newton berfokus pada suatu kerangka inersial sebagai kerangka acuan pengukuran gerak, apakah ada kerangka acuan yang diam (steady)? Bagaiman gerak bumi pada kerangka luar angkasa? Apakah kerangka acuan luar angkasa merupakan kerangka inersial? Atau kerangka yang diam?

Pada tahun 1887, fisikawan Amerika A. A. Michelson (1852-1931) dan E. W. Morley (1838-1923) mencoba menjawab pertanyaan tersebut melalui sebuah eksperimen. Eksperimen ini bertujuan untuk membuktikan ada tidaknya medium eter yang dapat diajukan sebagai kerangka inersial. Eksperimen tersebut dirancang untuk mengukur kelajuan bumi relatif pada luar angkasa yang dianggap mengandung eter oleh Maxwell (1831-1879). Fisikawan ini menggunakan alat yang sangat sensitif terhadap cahaya yang disebut interferometer untuk melakukan pengamatan seperti yang terlihat pada Gambar 7.2.

Seberkas cahaya dari sumber monokromatik dipisahkan menjadi dua berkas dengan jalur tegak lurus satu sama lain; dua berkas balok-balok ini dipantulkan dan digabungkan kembali untuk menunjukkan apakah ada perbedaan kecepatan rata-rata pada dua jalur bolak-balik. Interferometer diatur dengan satu jalur sejajar dengan gerakan Bumi dalam orbitnya. Kemudian Michelson dan Morley dengan hati-hati mengamati setiap perubahan kecepatan rata-rata saat peralatan diputar untuk menempatkan jalur lain sejajar dengan gerakan Bumi.



Gambar 7.2 Eksperimen Michelson-Morley

Sumber : Paul G. Hewitt/Conceptual Physics (2014)



### Ayo, Cermati!

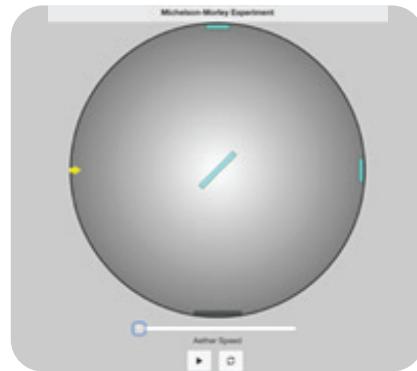
Cobalah lakukan eksperimen serupa melalui simulasi pada:

[https://galileoand einstein.phys.virginia.edu/more\\_stuff/Applets/MichelsonMorley/michelsonmorley.html](https://galileoand einstein.phys.virginia.edu/more_stuff/Applets/MichelsonMorley/michelsonmorley.html)



Petunjuk:

1. Mulailah dengan kecepatan eter nol (artinya tidak ada eter karena eter dianggap suatu senyawa yang bergerak)
2. Tekan tombol play (▶) dan amati apa yang terjadi
3. Ulah kecepatan eter sesuai keinginan kalian
4. Tekan tombol reset lalu tekan tombol play (▶) kemudian amati apa yang terjadi



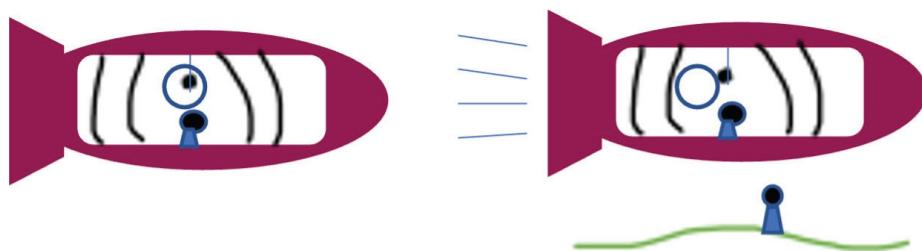
### Apa hasil pengamatanmu?

Berikan pendapatmu mengenai hasil pengamatan tersebut!

Berdasarkan eksperimen tersebut, Einstein (1838-1923) mengemukakan postulat merujuk pada kerangka acuan inersial yaitu kerangka acuan yang bergerak relatif pada kecepatan konstan (tetap) terhadap kerangka acuan lainnya. Dua postulat yang dikemukakan oleh Einstein, yaitu:

1. Hukum-hukum fisika memiliki bentuk yang sama pada semua kerangka acuan inersial.
2. Cahaya yang merambat di ruang hampa dengan kecepatan  $c = 3 \times 10^8$  m/s adalah sama untuk semua pengamat dan tidak bergantung pada gerak sumber cahaya maupun kecepatan pengamat.

Konsekuensi menarik dari postulat kedua Einstein adalah adanya konsep keserentakan. Dua buah peristiwa disebut serentak jika keduanya terjadi pada waktu yang sama. Sebagai contoh misalnya, ada suatu sumber cahaya tepat di tengah dinding roket seperti yang terdapat pada Gambar 7.3.a. Ketika sumber cahaya dinyalakan, cahaya menyebar ke segala arah dengan kecepatan  $c$ . Sumber cahaya berjarak sama dari ujung depan dan belakang dinding roket menyebabkan seorang pengamat di dalam dinding roket melihat bahwa cahaya mencapai ujung depan pada saat yang sama ketika mencapai ujung belakang. hal tersebut terjadi ketika roket dalam keadaan diam atau bergerak dengan kecepatan konstan. Cahaya mencapai bagian belakang dan bagian depan terjadi secara bersamaan untuk pengamat ini di dalam roket.



Gambar 7.3 Cahaya dalam dinding roket menurut 2 pengamat yang berbeda kerangka acuan  
Sumber : Paul G. Hewitt/Conceptual Physics (2015)

Bagaimana dengan pengamat luar yang memandang dua peristiwa yang sama dalam kerangka acuan lain —misalnya, dari planet yang tidak bergerak bersama roket? Berdasarkan tinjauan pengamat itu, dua peristiwa yang sama ini tidak serentak. Cahaya ketika keluar dari sumbernya, pengamat ini melihat roket bergerak maju, sehingga bagian belakang dinding roket bergerak ke arah sumber cahaya sementara bagian depan menjauh dari sumber cahaya. Oleh karena itu, cahaya yang menuju bagian belakang dinding roket memiliki jarak tempuh yang lebih pendek daripada cahaya yang bergerak ke depan seperti yang terdapat pada Gambar 7.3b.

Kecepatan cahaya adalah sama di kedua arah menyebabkan pengamat luar ini melihat peristiwa cahaya mengenai ujung belakang dinding roket

sebelum melihat peristiwa cahaya mengenai ujung depan dinding roket. (diasumsikan bahwa pengamat dapat melihat perbedaan kecil ini.) Oleh karena itu, jika ada seorang pengamat di roket lain yang melintas di arah yang berlawanan, maka ia akan melihat bahwa cahaya mencapai ujung depan dinding roket terlebih dahulu.

Ketidakserentakan peristiwa-peristiwa dalam satu bingkai dan serentak di bingkai lain ini merupakan hasil relativistik murni sebagai konsekuensi **cahaya yang selalu memiliki kecepatan yang sama untuk semua pengamat** (postulat kedua).



### 7.1 Ayo, Cek Pemahaman!

Jika pengamat yang berdiri di sebuah planet pada Gambar 7.3b melihat sepasang sambaran petir secara bersamaan mengenai ujung depan dan belakang dinding roket berkecepatan tinggi. akankah sambaran petir tersebut secara serentak bergerak ke pengamat di tengah dinding roket? (di sini kita berasumsi bahwa seorang pengamat dapat mendeteksi sedikit perbedaan waktu saat cahaya merambat dari ujung ke tengah dinding roket.

Jika ada dua orang pengamat A dan B, pengamat A diam pada tempat pengamatannya, sedangkan pengamat B adalah seseorang yang sedang bergerak. Apakah selang waktu pengamatan yang dilakukan pengamat A sama dengan pengamat B?

Transformasi Galileo merupakan transformasi koordinat pada suatu kerangka acuan tertentu. Pada relativitas Newton yang mengkaji gerak benda pada kerangka acuan, transformasi Galileo menjadi pendukung teori relativitas Newton. Pada transformasi Galileo, selang waktu pengamatan terhadap suatu peristiwa yang diamati oleh pengamat yang diam dan pengamat yang bergerak adalah sama ( $t_A = t_B$ ). Hal tersebut dipandang berbeda oleh Einstein dan menyatakan hal tersebut tidak benar. Einstein berpendapat bahwa selang waktu pengamatan antara kedua pengamat tersebut tidaklah sama ( $t_A \neq t_B$ ).

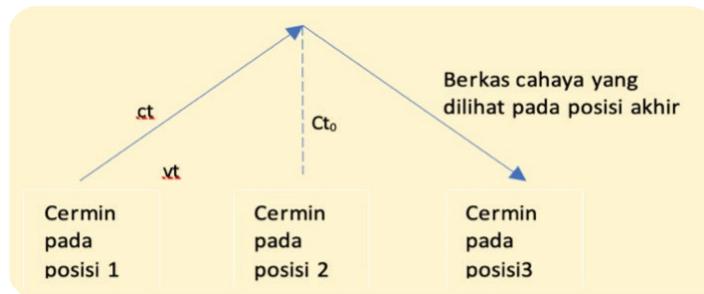
Hendrick A. Lorentz (1853-1928), seorang fisikawan asal Belanda menurunkan persamaan transformasi yang sesuai dengan transformasi galileo namun berlaku juga untuk kecepatan yang lebih tinggi (kecepatan cahaya). Persamaan tersebut dikenal dengan nama transformasi Lorentz, yang dapat berlaku untuk transformasi Galileo (pada kecepatan rendah) dan dapat menunjukkan bahwa kecepatan cahaya adalah sama pada setiap kerangka.



Ayo, Cermati!

### Penurunan Persamaan Transformasi Lorentz

Jam cahaya ditunjukkan dalam tiga posisi berturut-turut pada gambar di bawah ini. Garis-garis diagonal mewakili jalur kilatan cahaya yang dimulai dari cermin bawah pada posisi 1, bergerak ke cermin atas pada posisi 2, dan kemudian berjalan kembali ke cermin bawah pada posisi 3. Jarak pada diagram diberi label  $ct$ ,  $vt$ , dan  $ct_0$ , yang mengikuti dari fakta bahwa jarak yang ditempuh oleh benda yang bergerak beraturan adalah sama dengan kecepatannya dikalikan dengan waktu.



Gambar 7.4 Simulasi Gerak Cahaya Pada Posisi yang Berbeda

Sumber : Irma R.Suwarma/Kemendikbudristek (2022)

Seperti yang ditunjukkan Gambar 7.4, ketiga jarak ini membentuk segitiga siku-siku dengan  $ct$  adalah sisi miringnya dan  $ct_0$  dan  $vt$  adalah kakinya. Teorema geometri yang terkenal, teorema Pythagoras, menyatakan bahwa kuadrat sisi miring sama dengan jumlah kuadrat kedua kaki. Jika kita menerapkan rumus ini pada gambar, kita memperoleh:

$$c^2t^2 = c^2t_0^2 + v^2t^2$$

$$c^2t^2 - v^2t^2 = c^2t_0^2$$

$$t^2 \left[ 1 - \left( \frac{v^2}{c^2} \right) \right] = t_0^2$$

$$t^2 = \frac{t_0^2}{1 - \left( \frac{v^2}{c^2} \right)}$$

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \left( \frac{v^2}{c^2} \right)}} \quad \dots (7.1)$$

dengan  $v$  mewakili kecepatan jam relatif terhadap pengamat luar (sama dengan kecepatan relatif kedua pengamat) dan  $c$  adalah kecepatan cahaya.

**Buatlah interpretasi hubungan besaran-besaran fisis berdasarkan persamaan (7.1) di atas!**

Persamaan tersebut adalah faktor yang sama yang digunakan oleh Lorentz untuk menjelaskan pengerutan panjang. Kami menyebut kebalikan dari kuantitas faktor Lorentz ini,  $\gamma$  (Gamma), yaitu,

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \dots (7.2)$$

Berdasarkan hal ini pemikiran Einstein mengenai perbedaan selang waktu pengamatan dua pengamat tersebut tidaklah sama dapat dijelaskan dengan persamaan transformasi Lorentz.

## B. Dampak Relativitas Einstein

### 1. Dilatasi Waktu



Ayo, Bernalar Kritis!

Apa yang dimaksud dengan ruang dan waktu? Jika kalian memandang bintang yang terjauh, pernahkah kalian merasa bahwa bintang yang kita lihat paling jauh adalah bintang yang paling lama kita lihat? Mengapa hal itu terjadi?

Jika kalian menjadi seorang astronot dan pergi ke luar angkasa selama 10 tahun, apakah saat kembali ke bumi penambahan usiamu akan sama dengan temanmu yang tinggal di bumi ?

Ruang yang kita tinggali adalah tiga dimensi; sehingga kita dapat menentukan posisi setiap lokasi dalam ruang dengan tiga dimensi. Salah satu contoh dimensi tersebut dapat berupa utara-selatan, timur-barat, dan atas-bawah. Jika kita berada di sudut ruangan persegi panjang dan ingin menentukan posisi titik mana pun di ruangan itu, kita dapat melakukannya dengan tiga

angka. Yang pertama adalah jumlah meter titiknya berada di sepanjang garis yang menghubungkan dinding samping dan lantai; yang kedua adalah jumlah meter titiknya berada di sepanjang garis yang menghubungkan dinding belakang yang berdekatan dan lantai; dan yang ketiga adalah jumlah meter titik yang terletak di atas lantai atau di sepanjang garis vertikal yang menghubungkan dinding di sudut.

Fisikawan menyebut ketiga garis ini sebagai sumbu koordinat dari kerangka acuan seperti pada Gambar 7.5. Tiga angka—jarak sepanjang sumbu x, sumbu y, dan sumbu z—menentukan posisi suatu titik dalam ruang.

Pengukuran tersebut tidaklah lengkap jika tidak dikaitkan dengan waktu. Salah satu contohnya adalah ketika kalian mengidentifikasi sebuah box yang memiliki panjang, lebar, dan tinggi tertentu. Box tersebut tentu saja terbentuk pada suatu waktu tertentu (bisa jadi sebelumnya merupakan kardus yang belum berbentuk box), dan tidak selamanya box tersebut tetap akan menjadi box, karena bisa jadi setelah selesai digunakan box tersebut dibuang dalam bentuk lain.

Contoh lainnya dapat diamati pada peristiwa permainan sepakbola antar kelas yang dilombakan oleh sekolahmu pada pekan olah raga di siang hari jam 13.00 WIB pada tanggal 23 Mei 2022. Pada tanggal yang sama, sekolah lain di wilayah Indonesia timur melakukan kegiatan yang sama. Hal tersebut menunjukkan dua kejadian pada suatu ruang dan waktu yang berbeda.

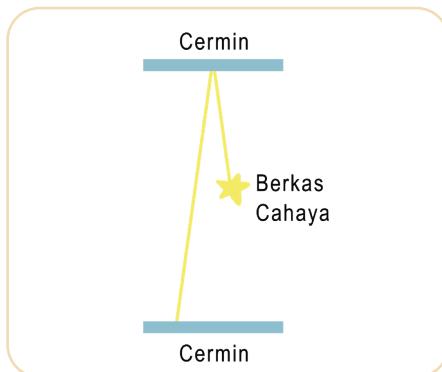
Hal inilah yang menjadi bukti **keterikatan antara ruang dan waktu**. Begitu juga saat kalian melihat bintang terjauh di angkasa, kalian memerlukan waktu yang cukup lama untuk dapat menentukan posisi bintang tersebut. Kalian memerlukan waktu yang lebih lama untuk dapat melihat bintang terjauh. Hal ini juga merupakan salah satu bukti keterikatan antara ruang dan waktu.

Keterikatan ruang dan waktu tersebut dapat dilukiskan dalam kerangka empat dimensi. Semakin besar jarak terukur dalam ruang, semakin besar interval waktu terukur. Rasio konstan ruang dan waktu untuk cahaya,  $c$ , adalah faktor pemersatu antara berbagai ruang-waktu. Hal ini merupakan inti dari postulat kedua Einstein.

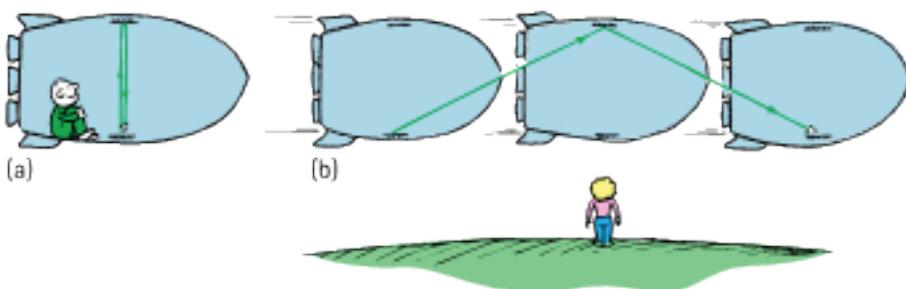
### Apakah waktu dapat diregangkan?

Bayangkan misalnya kita dapat mengamati kilatan cahaya yang memantul kesana kemari di antara sepasang cermin paralel, seperti bola yang memantul ke sana kemari antara lantai dan langit-langit. Jika jarak antara cermin tetap, maka susunannya merupakan jam cahaya karena perjalanan bolak-balik blitz mengambil interval waktu yang sama seperti yang terdapat pada Gambar 7.6.

Jam cahaya ini misalkan berada di dalam pesawat ruang angkasa yang transparan dan berkecepatan tinggi. Seorang pengamat yang berada dalam roket melihat jam cahaya tersebut Gambar 7.7a dan melihat kilatan yang memantul lurus ke atas dan ke bawah di antara dua cermin, sama seperti jika roket itu diam. Pengamat ini tidak melihat efek yang khusus. Hal ini terjadi karena pengamat berada di dalam kapal dan bergerak bersamanya, sehingga tidak ada gerakan relatif antara pengamat dan jam cahaya; dengan kata lain, **pengamat dan jam berbagi kerangka acuan yang sama dalam ruang-waktu**.



Gambar 7.5 Cermin yang menangkap cahaya  
Sumber : Nanda Auliaraha/Kemendikburistek (2022)



Gambar 7.6 (a) Pengamat bergerak sama dengan arah gerak roket,  
(b) Pengamat yang melihat gerak roket dari Bumi  
Sumber : Paul G. Hewitt/Conceptusl Phyics (2015)

Sekarang kita misalkan berdiri di tanah saat pesawat ruang angkasa melesat melewati kita dengan kecepatan tinggi — katakanlah setengah kecepatan cahaya. Hal-hal sangat berbeda dari kerangka acuan kita karena kita tidak melihat jalur cahaya sebagai gerakan naik-turun yang sederhana. Karena setiap *blitz* bergerak secara horizontal saat bergerak secara vertikal di antara dua cermin, kita melihat *blitz* mengikuti jalur diagonal.

Perhatikan pada Gambar 7.7b –terlihat dari kerangka acuan membumi kita, lampu kilat menempuh jarak yang lebih jauh karena membuat satu perjalanan bolak-balik di antara cermin-cermin, jauh lebih lama daripada jarak yang ditempuhnya dalam kerangka acuan pengamat yang naik bersama kapal. Kecepatan cahaya adalah sama di semua kerangka acuan (postulat kedua Einstein), maka lampu kilat harus melakukan perjalanan untuk waktu

yang lebih lama di antara cermin-cermin di bingkai kita daripada dibingkai referensi pengamat di dalam roket. Ini mengikuti definisi kecepatan—jarak dibagi waktu. Jarak diagonal yang lebih panjang harus dibagi dengan interval waktu yang lebih lama untuk menghasilkan nilai kecepatan cahaya yang tidak berubah. **Pemuluran waktu ini disebut dilatasi waktu.**



### Ayo, Cermati!

Ada sepasang kembar identik, salah satu anak kembar tersebut adalah astronot yang melakukan perjalanan pulang-pergi berkecepatan tinggi di galaksi sementara kembarannya tinggal di rumah di Bumi. Ketika astronot tersebut kembali, dia lebih muda dari kembaran yang tinggal di rumah. Seberapa besarkah perbedaannya?

Kerjakan simulasi pada :

<https://www.refs mmap.com/jspphys/relativity/relativity.html#twin-paradox>



From the point of view of observer 1 who is in an inertial reference frame, we see one twin travelling and returning. From this frame he is younger when he returns because he has been moving

Play    Replay    Speed: 8x    +    < Previous    Next >

kalian bisa merubah kecepatan lalu tekan tombol "Play" untuk mencatat angka-angka kalian bisa tekan "pause"

Cermati angka yang menunjukkan usia dan kecepatan dua anak kembar tersebut

Bagaimana paradoks kembar tersebut dijelaskan menurut relativitas Einstein?



### Ayo, Cek Pemahaman!

- 7.2 jika pesawat luar angkasa memancarkan sinyal "starting gun" awal diikuti dengan kilatan setiap 6 menit selama satu jam, berapa banyak kilatan yang akan dipancarkan?
- 7.3 Pesawat luar angkasa mengirimkan kilatan dengan jarak yang sama setiap 6 menit saat mendekati penerima dengan kecepatan konstan. akankah kedipan ini memiliki jarak yang sama ketika sampai ke penerima?

## 2. Penambahan Kecepatan



### Ayo, Bernalar Kritis!

Jika kalian berjalan 1 km/jam (terhadap permukaan bumi) di luar kereta api yang bergerak 60 km/jam(terhadap permukaan bumi), berapakah kecepatan relatif kalian terhadap permukaan bumi?

Benda yang bergerak seragam (tidak dipercepat) secara umum menggabungkan kecepatan dengan persamaan sederhana:

$$V = v_1 + v_2 \quad \dots (7.3)$$

Persamaan 7.3 ini tidak berlaku untuk cahaya, yang selalu memiliki kecepatan yang sama, c. Sebenarnya, persamaan di atas adalah pendekatan dari aturan relativistik untuk penambahan kecepatan. Penurunan persamaan kecepatan relativistik 7.4 tidak akan dibahas disini karena sudah dibahas pada transformasi Lorentz, tapi hanya persamaannya:

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}} \quad \dots (7.4)$$

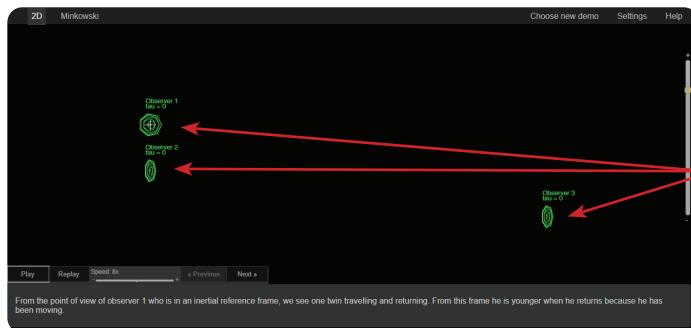
Nilai pembilang pada persamaan tersebut sangat sederhana, tapi jumlah sederhana dari penjumlahan kecepatan  $v_1$  dan  $v_2$  akan signifikan jika nilai kecepatannya mendekati nilai c.



### Ayo, Cermati!

Kerjakan simulasi pada: [https://www.refsammat.com/  
jsphys/relativity/velocity-addition.html](https://www.refsammat.com/jsphys/relativity/velocity-addition.html)





Cermati angka yang menunjukkan kecepatan bintang yang bergerak dari perspektif dua pengamat yang berbeda

Bagaimana penambahan kecepatan tersebut dijelaskan menurut relativitas Einstein?

Tuliskan hasil pengamatanmu!

Sebuah pesawat ruang angkasa bergerak menjauh dari kalian dengan kecepatan  $0,5c$ . Kecepatan tersebut mendorong roket ke arah yang sama, juga menjauh dari kalian, dengan kecepatan  $0,5c$  relatif terhadap dirinya sendiri. Seberapa cepat roket bergerak relatif terhadap kalian? Aturan nonrelativistik akan mengatakan bahwa roket bergerak dengan kecepatan cahaya dalam kerangka referensi kalian. Tapi faktanya

$$V = \frac{0,5c + 0,5c}{1 + \frac{0,25c^2}{c^2}} = \frac{c}{1,25} = 0,8c$$

Persamaan tersebut sehingga menunjukkan fakta baru terkait dengan relativitas, yaitu tidak ada benda yang dapat bergerak lebih cepat atau secepat cahaya.

Misalkan pesawat ruang angkasa tersebut malah menembakkan sinar laser sepanjang perjalannya. Seberapa cepat sinar laser bergerak dalam kerangka acuan kalian?

$$V = \frac{0,5c + c}{1 + \frac{0,25c^2}{c^2}} = \frac{1,5c}{1,5} = c$$

Berdasarkan perhitungan tersebut dapat disimpulkan bahwa **tidak peduli seberapa besar kecepatan relatif antara dua kerangka, cahaya yang bergerak dengan kecepatan  $c$  dalam satu kerangka**

**akan terlihat bergerak dengan kecepatan c dalam kerangka lainnya.** Kalian jika mencoba mengejar Cahaya, maka kalian tidak akan pernah bisa menangkapnya.



#### Ayo, Cek Pemahaman!

- 7.4 Jika sebuah pesawat luar angkasa melakukan perjalanan dengan kecepatan  $c$  terhadap kerangka acuan Bumi dan menembakkan drone ke depan dengan kecepatan  $c$  terhadap kerangka acuan pesawat itu sendiri. Tunjukan bahwa kecepatan drone tersebut terhadap kerangka acuan

### 3. Pengerutan Panjang



#### Ayo, Bernalar Kritis!

Jika ada dua buah benda yang sama dan bergerak dengan kecepatan yang berbeda. Misalkan benda satu bergerak dengan kecepatan  $0,3c$  dan yang satunya bergerak dengan kecepatan  $0,5c$ . Apakah bentuk panjang benda saat bergerak akan sama jika dilihat oleh pengamat pada kerangka acuan yang berbeda?

Saat benda bergerak melalui ruang waktu, ruang serta waktu berubah. Singkatnya, ruang berkontraksi, membuat objek terlihat lebih pendek ketika mereka bergerak dengan kecepatan relativistik. Pengerutan Panjang ini pertama kali diajukan oleh seorang fisikawan George F. FitzGerald (1851-1901) dan Hendrik A. Lorentz (1853-1928) telah disampaikan pada bahasan sebelumnya. Einstein memandang pengerutan yang terjadi pada ruang waktu sama dengan persamaan Lorentz:

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \dots (7.5)$$

dengan  $v$  adalah kecepatan relatif antara objek yang diamati dan pengamat,  $c$  adalah kecepatan Cahaya,  $L$  adalah panjang terukur objek bergerak, dan  $L_0$  adalah panjang terukur objek saat diam.



### Ayo, Cermati!

Berdasarkan persamaan 7.5, coba hitung nilai L, jika:

$$v = 0$$

$$v = 0,85 c$$

$$v = 0,5 c$$

Apa kesimpulanmu mengenai pengertian panjang berdasarkan hasil perhitunganmu?

Pengerutan panjang menjadi perhatian yang cukup besar bagi para penjelajah luar angkasa. Pusat galaksi Bima Sakti kita berjarak 25.000 tahun cahaya. Apakah ini berarti jika kita melakukan perjalanan ke arah itu dengan kecepatan cahaya, dibutuhkan waktu 25.000 tahun untuk sampai ke sana? Berdasarkan kerangka acuan Bumi, hal tersebut benar, tapi bagi para penjelajah luar angkasa, jelas tidak! Jika bergerak pada kecepatan cahaya, jarak 25.000 tahun cahaya akan menyusut hingga tidak ada jarak sama sekali. Para penjelajah luar angkasa yang dibayangkan akan tiba di sana secara instan!



### 7.5 Ayo, Cek Pemahaman!

Sebuah papan reklame berbentuk persegi panjang di luar angkasa memiliki ukuran  $10 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ . Seberapa cepat

Berdasarkan pembahasan pada bab relativitas ini, hipotesis umum untuk suatu perjalanan yang memiliki kecepatan mendekati kecepatan cahaya, maka pengertian panjang dan dilatasi waktu merupakan dua bentuk dari fenomena yang sama. Salah satu contohnya, yaitu jika astronot pergi begitu cepat sehingga mereka menemukan jarak ke bintang terdekat hanya 1 tahun cahaya dan bukannya 4 tahun cahaya yang diukur dari Bumi, maka mereka melakukan perjalanan dalam waktu kurang lebih dari 1 tahun. Pengamat di Bumi mengatakan hal berbeda, mereka berpendapat bahwa jam di pesawat ruang angkasa telah melambat sedemikian rupa sehingga mereka hanya berdetak 1 tahun dalam 4 tahun waktu Bumi.



## Proyek

### Ayo, Mencipta dan Berkreasi!

Buatlah poster yang menjelaskan tentang teori relativitas Einstein. Isi poster ini menjelaskan bagaimana teori relativitas Einstein berkembang dan dampaknya pada dunia ini.

### Rangkuman

1. Kerangka acuan merupakan sebuah titik pandang (biasanya satu set sumbu koordinat) sehubungan dengan posisi dan gerakan suatu objek yang dapat dijelaskan.
2. Relativitas Newton menyatakan bahwa suatu benda dikatakan bergerak apabila kedudukan benda tersebut berubah terhadap kerangka acuannya. Kerangka acuan Newton disebut dengan kerangka inersial.
3. Berdasarkan percobaan yang dilakukan Michelson-Morley, Einstein membuat dua buah postulat mengenai relativitas, yaitu: (a) semua hukum alam adalah sama di semua kerangka yang bergerak sama, (b) kecepatan cahaya di ruang bebas memiliki nilai terukur yang sama dan konstan.
4. Dilatasi waktu adalah selang waktu pengamatan yang merupakan perpanjangan waktu pengamatan bagi pengamat.
5. Pengurutan panjang merupakan pengurutan yang terjadi pada ruang suatu objek akibat kecepatan yang dimilikinya.

### Asesmen

1. Jika kalian berjalan dengan kecepatan 0,8 km/jam menyusuri lorong menuju bagian depan kereta api yang bergerak dengan kecepatan 60 km/jam, maka berapakah kecepatan kalian relatif terhadap tanah?

2. Cahaya membutuhkan waktu untuk merambat sepanjang lintasan dari satu titik ke titik lainnya. Jika jalur ini terlihat lebih panjang karena gerakan, apa yang terjadi dengan waktu yang dibutuhkan cahaya untuk menempuh jalur yang lebih panjang ini?
3. Sebuah roket A berkecepatan tinggi dilengkapi dengan sumber cahaya yang berkedip. Jika frekuensi kedipan yang terlihat pada roket B yang bergerak mendekat roket A pada jarak tertentu adalah dua kali frekuensi kedipan, maka:
  - a. berapakah perubahan periode (selang waktu antara kedipan)?
  - b. apakah periode ini konstan jika kecepatan relatif konstan?
  - c. apakah periode ini tetap jika gerak dipercepat?
  - d. jelaskan jawaban kalian.
5. Seorang penumpang di bus ekspres antar planet yang melaju dengan kecepatan  $0,99 c$  membutuhkan waktu tidur siang selama 5 menit, menurut arlojinya. Tunjukkan bahwa tidurnya dari sudut pandang planet tetap berlangsung selama 35 menit.

#### Refleksi

Setelah membaca dan mempelajari Bab 7 Relativitas, coba nilai seberapa dalam pemahamanmu. Berikan ceklist (✓) sesuai dengan pendapatmu!

Pernyataan	Tingkat Pemahaman			
	Kurang	Cukup	Baik	Baik Sekali
Prinsip relativitas Newton yang mengawali relativitas Einstein.				
Postulat pertama Einstein yang menyatakan bahwa hukum-hukum fisika memiliki bentuk yang sama pada semua kerangka acuan inersial.				
Postulat kedua Einstein tentang kecepatan cahaya $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ yang sama pada kerangka acuan apa pun				

Pernyataan	Tingkat Pemahaman			
	Kurang	Cukup	Baik	Baik Sekali
Dampak relativitas Einstein, yaitu pada dilatasi waktu, penambahan kecepatan, dan pengertian panjang.				



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI  
REPUBLIK INDONESIA 2022**

**Fisika untuk SMA/MA Kelas XII**

Penulis : Irma Rahma Suwarma, Lia Laela Sarah

ISBN : 978-623-472-722-7 (jil.2)

Sumber: phys.org (2022)

# BAB 8

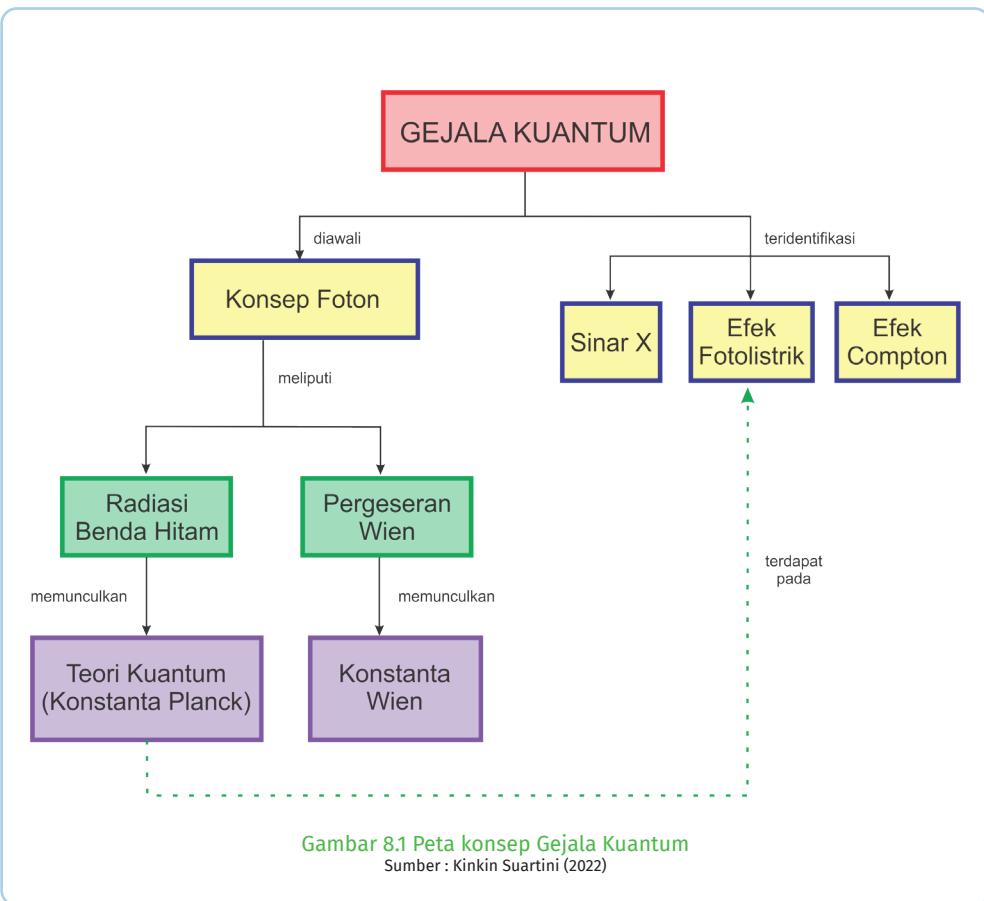
# GEJALA KUANTUM

## Kata Kunci

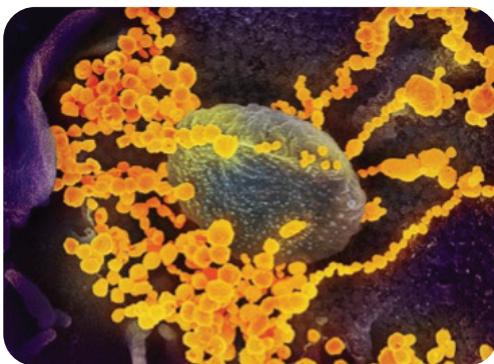
Foton • Efekfotolistrik • Hipotesa Planck • Efek Compton • Sinar-X

### Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, kalian dapat menganalisis gejala kuantum (radiasi benda hitam, teori kuantum Planck, efek fotolistrik, efek compton, dualitas gelombang partikel, dan sinar-X) serta penerapannya dalam kehidupan sehari-hari.



Gambar 8.1 Peta konsep Gejala Kuantum  
Sumber : Kinkin Suartini (2022)



Gambar 8.2 Foto virus SarCov-2 hasil SEM  
Sumber: NIAID / Wikimedia Commons (2020)

Mikroskop elektron atau *scanning microscope electron* (SEM) sudah banyak digunakan oleh para peneliti untuk mendapatkan foto dari objek-objek yang super kecil seperti virus SarCov-2 (virus Corona). Prinsip kerja dari SEM ini menggunakan fakta yang pada abad 20 mengejutkan para fisikawan, yaitu partikel elektron ternyata dapat memiliki perilaku seperti gelombang. Elektron dengan

panjang gelombang lebih kecil dari panjang gelombang cahaya tampak digunakan pada mikroskop elektron untuk mendapatkan resolusi gambar yang tajam dan setiap detailnya akurat.



### Ayo, Bernalar Kritis!

Apa perbedaan dasar dari partikel dan gelombang?

Apakah cahaya termasuk partikel atau gelombang?

Prediksi perilaku apa yang dimiliki elektron pada mikroskop elektron sehingga bersifat seperti gelombang?

## A. Konsep Foton



### Ayo, Cermati!

#### FAKTA

Thomas Young (1773-1829), pada 1801 melakukan “eksperimen celah ganda” yang membuktikan bahwa cahaya adalah fenomena gelombang. Pandangan ini diperkuat oleh prediksi Maxwell (1831-1879) pada 1862 bahwa cahaya membawa energi dalam medan listrik dan medan magnet yang berosilasi. Dua puluh lima tahun kemudian, Heinrich Hertz (1857-1894) menggunakan rangkaian listrik untuk mendemonstrasikan gelombang elektromagnetik (frekuensi radio) dan menunjukkan cahaya sebagai salah satu bentuk gelombang elektromagnetik. Selanjutnya Max Planck (1858-1947) pada 1901 mempublikasikan tentang teori kuantum cahaya. Planck dalam teorinya berhipotesis bahwa cahaya merupakan paket-paket energi dalam berkas diskrit yang disebut kuanta atau foton.

Planck memulai revolusi ide dengan hipotesisnya yang telah mengubah cara berpikir tentang berbagai fenomena. Hipotesis ini mulai dipercaya pada 1905. Saat itu, Albert Einstein menggunakan teori kuantum cahaya untuk menjelaskan gejala fenomena efek fotolistrik yang sebelumnya tidak dapat dijelaskan dengan teori gelombang. Gagasan efek fotolistrik ini mengantarkan Einstein menjadi pemenang Hadiah Nobel Fisika 1921.

Einstein menyatakan bahwa cahaya yang berinteraksi dengan materi pada efek fotolistrik tidak dalam gelombang kontinu seperti teori Maxwell, tapi dalam paket energi sesuai teori kuantum Planck. Secara garis besar, kumpulan hukum yang berkembang dari 1900 hingga akhir 1920-an yang

menggambarkan semua fenomena kuantum dunia mikro dikenal sebagai **fisika kuantum**.

## 1. Radiasi Benda Hitam



Ayo, Bernalar Kritis!

Apa yang dimaksud dengan radiasi benda hitam?

Apakah setiap benda memiliki radiasi panas?

Apakah ada benda hitam sempurna?

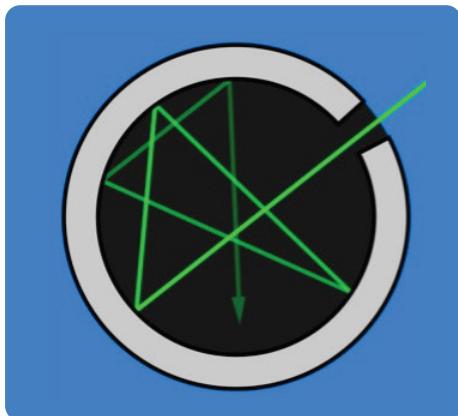
Mengapa jika kita mengenakan pakaian berwarna hitam pada siang hari akan terasa lebih panas dibandingkan kita memakai pakaian berwarna putih?



Ayo, Ingat Kembali!

Energi dari Matahari mampu melewati ruang angkasa menembus atmosfer Bumi kemudian menghangatkan permukaan Bumi. Perpindahan energi ini tidak melewati atmosfer secara konduksi karena udara merupakan konduktor yang buruk dan tidak juga melalui konveksi karena konveksi dimulai hanya setelah Bumi dihangatkan. Konduksi maupun konveksi tidak mungkin terjadi di ruang kosong antara atmosfer dan Matahari. Oleh karena itu, energi dari Matahari tersebut dialirkan dengan cara lain, yaitu melalui **radiasi** sehingga disebut **energi radiasi (radian energy)**.

Kalian pada bab 5 sudah mengetahui bahwa semua objek atau benda memancarkan radiasi karena suhunya lebih besar dari 0 K. Kalian pada suhu normal ( $\sim 300$  K) tidak dapat merasakan atau melihat adanya radiasi tersebut karena panjang gelombangnya berada dalam rentang inframerah dari gelombang elektromagnetik. Saat objek dipanaskan mencapai sekitar  $\sim 1000$  K, energi radiasinya cukup menghasilkan spektrum cahaya tampak sehingga objek berpijar merah muda. Jika suhu objek lebih dari 2000 K, maka objek akan bersinar dengan warna kuning atau putih, contoh pada lampu filamen. Dengan demikian, spektrum yang diemisikan oleh setiap benda dipengaruhi oleh suhunya.



Gambar 8.3 Benda hitam sempurna  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)

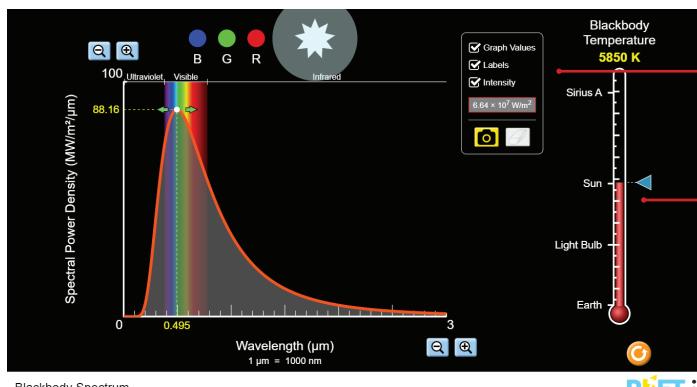
Sebuah benda yang mampu menyerap seluruh radiasi yang mengenainya disebut dengan **benda hitam sempurna**. Benda hitam sempurna diibaratkan sebuah rongga dengan lubang kecil yang ketika seberkas cahaya masuk ke dalamnya, cahaya tersebut akan dipantulkan terus menerus di dalamnya dan tidak dapat keluar dari rongga.



### 8.1 Ayo, Amati!

Cobalah lakukan pengambilan data melalui simulasi PHEt pada:

[https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum_en.html)



1. Ubah nilai temperatur
2. tampilkan nilai pada grafik

Blackbody Spectrum

PHET

Buatlah tabel pengumpulan data, temukan hubungan suhu dan panjang gelombang pada puncak gelombang. Kemudian, tuliskan interpretasi Kalian terhadap data tersebut!

Istilah benda hitam pertama kali diperkenalkan oleh Gustav Kirchoff (1824-1887) pada 1859. Radiasi benda hitam adalah radiasi gelombang elektromagnetik ketika benda berada dalam kesetimbangan termal dengan lingkungannya. Kirchoff membuktikan suatu teorema bahwa setiap benda yang berada dalam kesetimbangan termal memiliki daya radiasi yang

dipancarkan sebanding dengan daya yang diserapnya. Pernyataan tersebut dituliskan dalam persamaan berikut:

$$R_f = J(f, T) \quad (8.1)$$

$J(f, T)$  merupakan fungsi universal (untuk semua benda) yang bergantung pada frekuensi cahaya ( $f$ ) dan suhu mutlak ( $T$ ).

Joseph Stefan dan Ludwig Boltzman pada 1879, melakukan eksperimen laju energi radiasi yang dipancarkan sebuah permukaan benda yang kemudian dikenal dengan Hukum Stefan-Boltzman. Hukum Stefan-Boltzmann menyatakan bahwa total intensitas radiasi yang dipancarkan sama dengan luas daerah di bawah grafik kurva distribusi spektrum. Boltzman juga menyatakan bahwa jika suhu meningkat dari 2000K ke 4000K (2 kali) maka total intensitas radiasi yang dipancarkan adalah  $2^4$  atau 16 kali lipat (lihat kembali hasil 8.1 Ayo, Cermati!).

Hasil eksperimen ini menyimpulkan bahwa daya total per satuan luas yang dipancarkan pada semua frekuensi ( $I_{tot}$ ) sebanding dengan pangkat empat suhu mutlaknya. Hasil penemuan tersebut dirumuskan dalam persamaan:

$$I_{total} = \int R_f df = \sigma T^4 \quad (8.2)$$

$I_{tot}$  adalah intensitas radiasi (daya per satuan luas) pada permukaan suatu benda hitam pada semua frekuensi.  $R_f$  adalah intensitas radiasi per satuan frekuensi,  $T$  adalah suhu mutlak benda, dan  $\sigma$  adalah tetapan Stefan Boltzman sebesar  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^4$ . Jika suatu benda bukan merupakan benda hitam, maka benda tersebut akan memenuhi hukum yang sama namun diberi koefisien emisivitas  $e$ , sehingga persamaan 8.2 menjadi:

$$I_{total} = e\sigma T^4 \quad (8.3)$$

$$P/A = e\sigma T^4 \text{ atau } P = e\sigma AT^4 \quad (8.4)$$



### 8.1 Ayo, Cek Pemahaman!

Seorang petani tetap merasa kedinginan, padahal ia menyalakan pembakar propana di lumbungnya pada pagi yang dingin dan memanaskan udara hingga  $20^\circ\text{C}$  ( $68^\circ\text{F}$ ). Kenapa petani itu masih merasa kedinginan?

## 2. Pergeseran Wien



### Ayo, Bernalar Kritis!

Pada panjang gelombang berapa suatu intensitas radiasi yang dipancarkan dari suatu benda hitam mencapai titik maksimum?

Dapatkan kita menghitung suhu suatu benda berdasarkan panjang gelombang radiasinya?

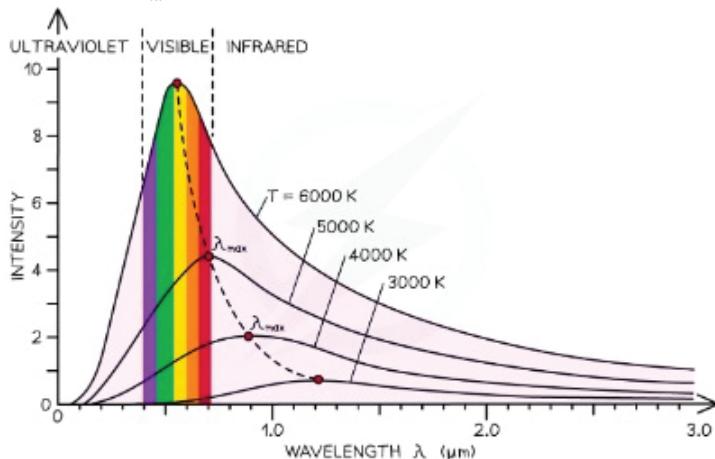


### 8.2 Ayo, Amati!

Buka Kembali link simulasi PhET berikut:

[https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum_en.html)

1. Ambil data panjang gelombang maksimum pada suhu sesuai pada Gambar 8.1.
2. Buatlah tabel hasil pengamatan.
3. Buatlah hubungan matematis antara panjang gelombang maksimum ( $\lambda_{max}$ ) dengan suhu mutlak (T).



Gambar 8. 4 Grafik data pergeseran wien

Sumber : unknown/savemyexam.co.uk(2022)

Tuliskan data pengamatan dan hitunglah data tersebut pada kertas terpisah.

Coba kalian lihat kegiatan 8.2 Ayo, Cermati! teramati bahwa panjang gelombang pada intensitas radiasi maksimum suatu benda hitam ( $\lambda_{max}$ ) bergeser ke panjang gelombang lebih pendek saat suhunya naik. Perhatikan Gambar 8.4, pada intensitas radiasi maksimum, semakin tinggi suhu benda T maka panjang gelombangnya  $\lambda_m$  semakin kecil

$$\lambda_m \cdot T = K \quad (8.5)$$

Persamaan ini dikenal sebagai persamaan pergeseran Wien dengan K adalah konstanta Wien sebesar  $2,898 \times 10^{-3}$  mK. Persamaan pergeseran Wien ini dapat digunakan untuk menghitung seberapa panas suatu bintang berdasarkan pancaran radiasi yang dihasilkannya.

**Contoh Kasus:**

Spektrum radiasi bintang Rigel di konstelasi Orion memuncak pada panjang gelombang 263 nm, sedangkan spektrum bintang Betelgeuse memuncak pada panjang gelombang 828 nm. Manakah dari kedua bintang ini yang lebih dingin, Betelgeuse atau Rigel?

**Jawab:**

$$\lambda_{max}T = 2,9 \times 10^{-3} \text{ mK}$$

$$T = \frac{2,9 \times 10^{-3}}{\lambda_{max}}$$

$$\text{Rigel: } T = \frac{2,9 \times 10^{-3}}{\lambda_{max}} = \frac{2,9 \times 10^{-3}}{263 \times 10^{-9}} = 11026 = 11000\text{K}$$

$$\text{Betelgeuse: } T = \frac{2,9 \times 10^{-3}}{\lambda_{max}} = \frac{2,9 \times 10^{-3}}{828 \times 10^{-9}} = 11026 = 11000\text{K}$$

### 3. Teori Kuantum Planck

Ide mengenai kuantisasi energi yang dikemukakan oleh Max Planck (1858-1947) merupakan suatu hal baru yang tidak dapat dijelaskan dalam fisika klasik. Planck pada 1900 memulai percobaannya mengenai benda hitam, saat itu elektron belum ditemukan. Planck merepresentasikan benda hitam sebagai sejumlah osilator atomik yang masing-masing menyerap dan memancarkan gelombang elektromagnetik. Planck berhipotesis bahwa:

Energi radiasi yang dipancarkan oleh osilator atomik tidak kontinu melainkan berupa paket-paket energi diskrit.

$$E_n = nhf \quad (8.6)$$

dengan  $n$  adalah bilangan asli,  $f$  adalah frekuensi getaran (hertz) dan  $h$  adalah konstanta Planck,

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Js.}$$

Konstanta Planck ( $h$ ) memiliki peranan yang sangat penting. Konstanta Planck adalah konstanta dasar alam yang berfungsi untuk menetapkan batas bawah pada atom dan muncul berulang kali dalam fisika kuantum. Persamaan  $E = hf$  memberikan jumlah energi terkecil yang dapat diubah menjadi cahaya dengan frekuensi  $f$ . Radiasi cahaya yang dipancarkan ini tidak secara terus menerus tetapi dipancarkan sebagai paket energi berupa aliran foton, dengan masing-masing foton memiliki frekuensi  $f$  dan membawa energi  $hf$ .

Kalian dengan memahami bahwa energi cahaya sebesar  $E=hf$ , maka kalian juga dapat memahami mengapa radiasi *microwave* tidak dapat merusak jaringan sel hidup seperti halnya sinar ultraviolet (UV) dan sinar-X. Frekuensi *microwave* lebih rendah dari sinar-X dan sinar UV sehingga menghasilkan energi foton yang rendah. Oleh karena itu, radiasi *microwave* tidak mampu mengionisasi jaringan sel hidup. Foton dari sinar ultraviolet dapat memberikan energi sekitar satu juta kali lebih besar karena frekuensi radiasinya satu juta kali lebih besar daripada frekuensi *microwave*. Sinar-X juga demikian, frekuensinya tinggi sehingga dapat menghasilkan energi foton lebih tinggi dari UV dan menyebabkan kesusakan jaringan sel jika terpapar berlebihan.



### 8.2 Ayo, Cek Pemahaman!

1. Apa yang dimaksud dengan istilah kuantum?
2. Berapa energi total dalam suatu berkas monokromatik yang memiliki frekuensi  $f$  dan terdiri dari  $n$  foton?

## B. Efek Fotolistrik



### Ayo, Bernalar Kritis!

Apa yang dimaksud dengan efek fotolistrik?

Bagaimana proses efek fotolistrik terjadi?

Faktor apa saja yang mempengaruhi terjadi efek fotolistrik?

Apa aplikasi efek fotolistrik dalam kehidupan sehari-hari?



Gambar 8.5 Digital kamera  
Sumber: Kreuzchanabel / Wikimedia Commons (2012)

Akhir abad ke-19, beberapa peneliti memperhatikan bahwa cahaya mampu mengeluarkan elektron dari berbagai permukaan logam. Fenomena ini dikenal dengan efek fotolistrik. Salah satu pemanfaatan fenomena efek fotolistrik pada produk teknologi adalah *charge-coupled device* (CCD) pada kamera digital yang berfungsi sebagai pengganti film untuk menangkap gambar dalam bentuk kumpulan-kumpulan elektron.

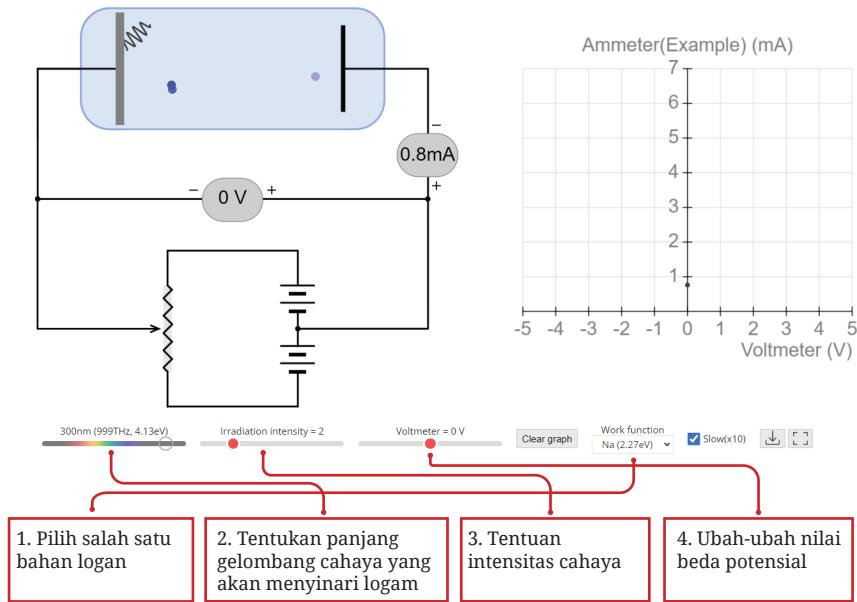
CCD juga digunakan pada perekam *camcorder* dan pemindai elektronik yang digunakan astronom untuk menangkap gambar planet-planet dan bintang.



### 8.3 Ayo, Amati!

Coba analisis eksperimen efek fotolistrik melalui simulasi pada link berikut: [https://javalab.org/en/photoelectric\\_effect\\_2\\_en/](https://javalab.org/en/photoelectric_effect_2_en/).

Pada simulasi tersebut, sebuah lempeng disinari suatu sumber cahaya dengan frekuensi  $f$  diarahkan ke target T dan mengeluarkan elektron dari lempeng tersebut. Sebuah beda potensial  $V$  diatur antara target T dan tempat pengumpul arus C untuk menampung elektron ini (disebut sebagai fotoelektron). Kumpulan ini menghasilkan arus fotolistrik  $i$  yang diukur dengan ampermeter A.



- Amati grafik arus (i) yang terbentuk dari perubahan  $V$  (beda potensial) yang kalian lakukan. Temukan nilai  $V_{stop}$ , nilai  $V$  saat grafik menunjukkan nilai  $I$  yang mengalami penurunan atau keadaan nilai  $I$  pada grafik tidak berubah (konstan).
- Cari nilai energi maksimum yang dihasilkan dari pergerakan elektron.

$$E = hf$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

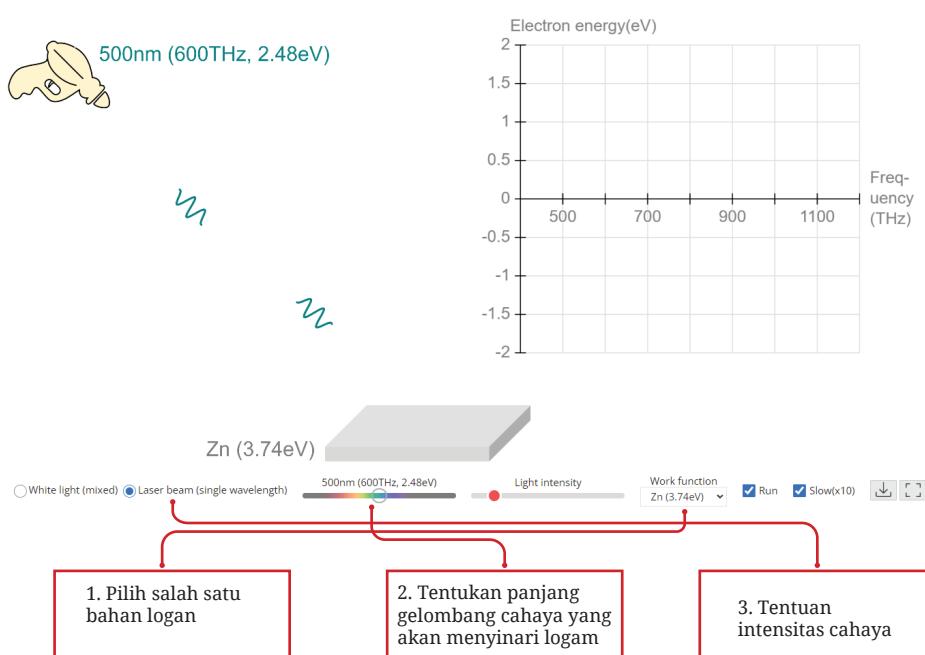
$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Buatlah tabel hasil pengamatan serta grafik  $V$  terhadap  $I$ . Kemudian tentukan nilai energi kinetik maksimum untuk sejumlah elektron yang dilepaskan. Buatlah interpretasi antara energi kinetik dengan beda tegangan.

Tulis jawabanmu disini:

$$K_{max} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Buka link berikut: [https://javalab.org/en/photoelectric\\_effect\\_en/](https://javalab.org/en/photoelectric_effect_en/)



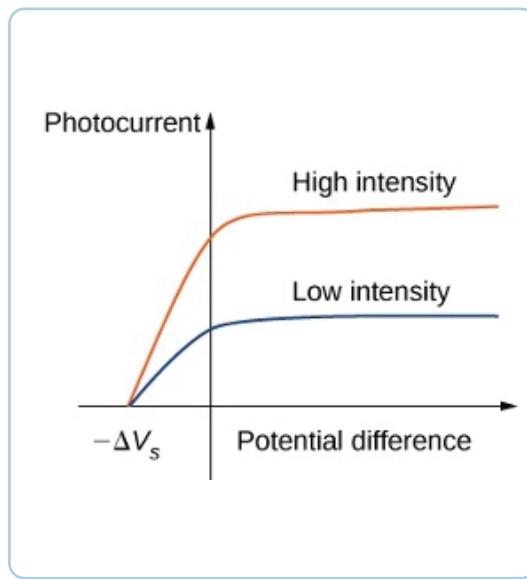
Tuliskan data hasil pengamatanmu dan buatlah grafik untuk merepresentasikan data tersebut.

Tuliskan kesimpulan hasil pengamatanmu.

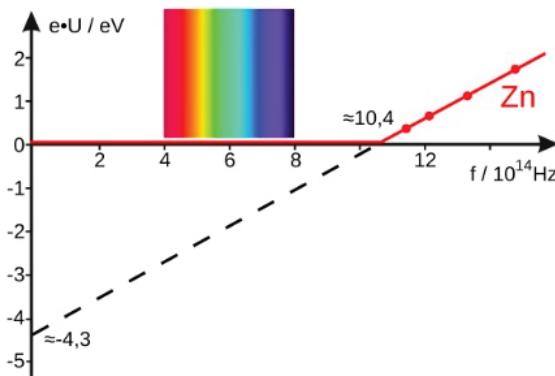
Hasil eksperimen efek fotolistrik ini merupakan teka-teki bagi fisika klasik. Tinjauan fisika klasik, cahaya adalah gelombang elektromagnetik yang berosilasi secara sinusoidal. Saat cahaya mengenai logam, elektron dalam logam ikut berosilasi karena gaya listrik dari gelombang elektromagnetik cahaya tersebut. Jika amplitudo atau intensitas cahaya diperbesar, maka amplitudo elektron juga cukup besar sehingga elektron mampu melepaskan diri dari permukaan logam. Kenyataannya hal tersebut tidak terjadi. Pada percobaan ini, amplitudo gelombang cahaya atau intensitas cahaya tidak mempengaruhi energi elektron yang keluar dari permukaan logam.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa elektron keluar dari logam segera setelah mendapatkan cahaya dengan frekuensi tertentu meskipun cahayanya paling redup atau intensitasnya paling kecil. Kecerahan cahaya sama sekali tidak mempengaruhi energi elektron yang keluar dari logam. Grafik intensitas cahaya terhadap arus listrik sebagai hasil keluarnya elektron dari logam terlihat pada Gambar 8.6. Saat intensitas cahaya diperbesar (lebih terang), lebih banyak elektron keluar dari logam sehingga arus listriknya semakin besar. Beda potensial henti ( $-\Delta V_s$ ) elektron padahal sama besar untuk setiap intensitas cahayanya. Hal ini, menunjukkan bahwa kecepatan atau energi kinetik elektron tidak dipengaruhi intensitas cahayanya.

Sisi lain, seberkas sinar ultraviolet (frekuensi cahaya lebih tinggi) dengan intensitas lemah menghasilkan lebih sedikit elektron tetapi pada kecepatan yang jauh lebih tinggi. Contoh grafik energi elektron dan frekuensi cahaya yang digunakan terlihat pada Gambar 8.7.



Gambar 8.6 Grafik intensitas cahaya terhadap arus listrik



Gambar 8. 7 Grafik energi elektron terhadap frekuensi cahaya pada Zn

Sumber : Ponor / Wikimedia Commons (2020)

Elektron pada peristiwa efek fotolistrik Zn tidak mampu keluar dari logam ketika diberi cahaya tampak. Elektron saat diberi cahaya dengan frekuensi mendekati  $10,4 \times 10^{14}$  Hz mampu keluar dari logam dan jika diberi cahaya lebih tinggi lagi elektron mampu bergerak dengan energi yang lebih besar.

Einstein mempublikasikan makalahnya pada 1905 untuk menjelaskan fenomena hasil eksperimen efek fotolistrik ini. Einstein juga menjelaskan gerak Brown dan mengemukakan teori relativitas khusus. Einstein menggunakan teori kuantum cahaya Planck untuk menjelaskan fenomena efek fotolistrik.

Cahaya menurut teori kuantum adalah paket-paket energi yang disebut foton. Einstein menghubungkan sifat kuantum cahaya dengan peristiwa efek fotolistrik dan memandang radiasinya sebagai hujan es partikel. Satu foton diserap sepenuhnya oleh setiap elektron yang keluar dari logam sehingga tidak ada penundaan waktu keluarnya elektron dari logam.

Cahaya agar dapat mengeluarkan elektron dari permukaan logam, maka energi cahaya tersebut harus lebih besar dari energi ambang logam atau fungsi kerja logam,  $W_0$ . Fungsi kerja ini diperlukan agar elektron mampu meninggalkan permukaan logam. Foton frekuensi rendah dengan energi kurang dari  $W_0$  tidak mampu mengeluarkan elektron dari permukaan logam.

Energi foton lebih besar dari  $W_0$  menghasilkan efek fotolistrik (mengeluarkan elektron). Energi foton yang masuk sebesar  $E$ , akan sama dengan energi kinetik elektron yang keluar  $K_{max}$  ditambah energi yang dibutuhkan untuk mengeluarkannya dari logam  $W_0$ . Einstein merumuskan hal tersebut pada persamaan:

$$E = K_{max} + W_0$$

dengan  $E$  adalah besar energi cahaya,  $E = hf$ ,  $K_{max}$  adalah energi kinetik elektron dan  $W_0$  adalah fungsi kerja logam

$$W_o = hf_0$$

dengan  $f_0$  adalah frekuensi ambang logam, yaitu frekuensi cahaya yang dibutuhkan untuk mengeluarkan elektron dari permukaan logam.



### 8.3 Ayo, Cek Pemahaman!

1. Apakah cahaya yang lebih terang mengeluarkan lebih banyak elektron dari permukaan fotosensitif daripada cahaya yang lebih redup dengan frekuensi yang sama?
2. Apakah cahaya frekuensi tinggi mengeluarkan lebih banyak elektron daripada cahaya frekuensi rendah?

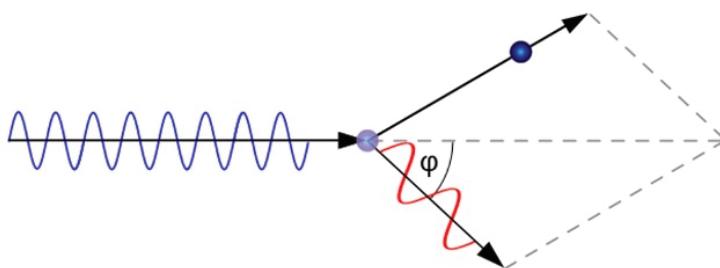
## C. Efek Compton



### Ayo, Bernalar Kritis!

Kalian telah memahami bahwa elektron dapat keluar dari sebuah lempeng logam saat disinari cahaya pada fenomena fotolistrik. Bagaimana gerakan elektron tersebut saat keluar dari lempeng logam? Apakah memiliki pola gerakan yang sama?

Einstein walaupun telah mempublikasikan penjelasannya mengenai efek fotolistrik dengan teori kuantum cahaya pada 1905, teori teori kuantum cahaya baru diterima secara luas pada 1923 setelah Arthur H. Compton menggunakan model kuantum untuk menjelaskan eksperimennya mengenai hamburan sinar -X pada grafit. Saat foton dari sinar-X bertabrakan dengan elektron, foton melepaskan sebagian energinya dan diserap oleh elektron. Panjang gelombang foton meningkat atau frekuensinya menurun setelah bertumbukan. Fenomena ini disebut efek Compton dan dijelaskan dengan persamaan yang menghubungkan kehilangan energi foton dengan sudut hamburan.



Gambar 8.8 Efek Compton  
Sumber : Lia L. Sarah/Kemendikbudristek (2022)



### Ayo, Berdiskusi!

Simak dan cermati kembali Gambar 8.8.

Sinar-x menumbuk suatu elektron, kemudian sinar-x tersebut dihamburkan kembali dengan sudut tertentu.

Bagaimana panjang gelombang sinar yang dihamburkan tersebut? Jelaskan dampaknya terhadap energi cahaya tersebut.

Tuliskan persamaan momentum yang dialami akibat tumbukan foton dan elektron tersebut.

Compton dengan menghitung perbedaan panjang gelombang sebelum dan setelah tumbukan, ia menemukan suatu persamaan. Tuliskan persamaan Yang dirumuskan oleh Compton.

Pengurangan frekuensi foton yang dihamburkan adalah bukti mendasar untuk proporsionalitas energi dengan frekuensi cahaya, dan untuk kinematika relativistik elektron. Klein dan Nishina pada 1929 menghitung distribusi sudut hamburan Compton dari elektron bebas dalam salah satu aplikasi pertama elektrodinamika kuantum (QED). Klein-Nishina memberikan probabilitas, penampang diferensial sehingga foton akan dihamburkan ke sudut tertentu. Saat ini, ketika diterapkan pada proses elektromagnetik 50 juta kali lebih energik, prediksi QED tampaknya masih terbukti.

Compton menunjukkan beda panjang gelombang cahaya setelah tumbukan  $\lambda'$  dan panjang gelombang cahaya datang  $\lambda$  berhubungan dengan sudut hamburannya  $\theta$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

dengan  $m$  adalah massa electron (kg) dan  $c$  adalah laju cahaya (m/s).



### 8.4 Ayo, Cek Pemahaman!

Apakah panjang gelombang cahaya saat dihamburkan setelah tumbukan antara foton dan elektron akan mengalami perubahan energi?

## D. Dualitas Gelombang Partikel

Fenomena efek fotolistrik membuktikan bahwa cahaya memiliki sifat partikel. Sisi lain, fenomena interferensi menunjukkan bahwa cahaya memiliki

sifat gelombang. Dalam fisika klasik ini kontradiktif. Sudut pandang fisika kuantum, cahaya memiliki sifat keduanya baik “seperti gelombang” maupun “seperti partikel” tergantung pada tinjauan eksperimennya.

Berkaitan dengan ini, pada 1923 De Broglie (1892–1987) mengusulkan hipotesis bahwa karena gelombang cahaya dapat menunjukkan perilaku seperti partikel, maka partikel juga dapat menunjukkan perilaku seperti gelombang. De Broglie mengusulkan bahwa semua materi yang bergerak memiliki panjang gelombang yang terkait dengan gerakannya. De Broglie mengusulkan hubungan panjang gelombang  $\lambda$  dengan momentum geraknya  $p$  adalah:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

dengan  $h$  adalah konstanta Planck.

Hipotesis ini baru dibuktikan oleh Clinton J. Davisson (1881–1958) and Lester H. Germer (1896–1971) yang masing-masing melakukan eksperimen secara terpisah. Davisson dan Germer menembakan berkas elektron ke kristal nikel dan mengamati bahwa elektron menunjukkan perilaku difraksi sebagai sifat gelombang, dengan panjang gelombang sesuai hipotesis De Broglie.



#### Ayo, Berdiskusi!

Meskipun menurut hipotesis De Broglie semua materi memiliki panjang gelombang, tapi efek panjang gelombang yang teramat hanya berlaku pada partikel dengan ukuran yang sangat kecil. Jelaskan mengapa hal ini berlaku demikian? Apakah ada syarat lain agar panjang gelombang partikel dapat teramat?.

## E. Sinar-X



#### Ayo, Bernalar Kritis!

Apa yang dimaksud dengan sinar-x?  
Apakah salah satu bagian tubuh kalian pernah disiniari oleh sinar-x? Bagaimana proses kerja sinar-x?



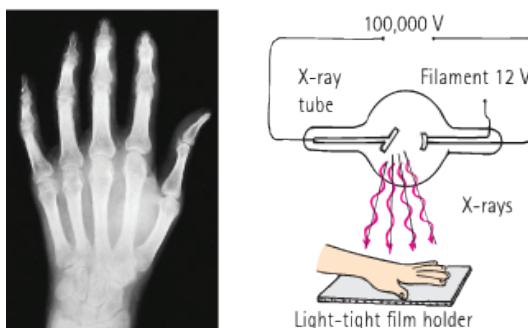
### Ayo, Ingat Kembali!

Sinar-x merupakan salah satu bentuk gelombang elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang antara  $10^{-8}$ - $10^{-12}$

Penyelidikan lebih dalam tentang atom dimulai pada 1895 ketika fisikawan Jerman Wilhelm Roentgen (1845-1923) menemukan sinar-x. Dinamakan sinar-x karena sinar tersebut sifatnya belum diketahui. Roentgen menemukan “sinar jenis baru” ini yang dihasilkan oleh seberkas “sinar katoda” (kemudian ditemukan sebagai elektron) yang mengenai permukaan kaca tabung pelepasan gas.

Roentgen menemukan bahwa sinar-x dapat menembus bahan padat, dapat mengionisasi udara, tidak menunjukkan pembiasan pada kaca, dan tidak dibelokkan oleh medan magnet. Sinar-x adalah gelombang elektromagnetik frekuensi tinggi, biasanya dipancarkan oleh eksitasi elektron orbital terdalam atom. Arus elektron dalam lampu fluoresen mengeluarkan elektron terluar atom dan menghasilkan foton ultraviolet dan cahaya tampak, berkas elektron yang memiliki cukup energi dan mengenai permukaan padat menggerakkan elektron terdalam dan menghasilkan foton frekuensi tinggi dari radiasi sinar-X.

Foton sinar-x memiliki energi yang tinggi dan dapat menembus banyak lapisan atom sebelum diserap atau dihamburkan. Sinar-x melakukan ini saat melewati jaringan lunak untuk menghasilkan gambar tulang di dalam tubuh (Gambar 8.9). Tabung sinar-x modern, di dalamnya target berkas elektron adalah pelat logam bukan dinding kaca tabung.



Gambar 8.9 Proses kerja sinar-x  
Sumber : Paul G. Hewitt/Conceptual Physics (2015)

fotografi terbungkus di laci di samping beberapa kristal yang mengandung uranium.

Awal 1896, beberapa bulan setelah Roentgen mengumumkan penemuan sinar-x, fisikawan Prancis Antoine Henri Becquerel (1852-1908) menemukan jenis radiasi penetrasi baru. Becquerel sedang mempelajari fluoresensi dan fosforensi yang diciptakan oleh cahaya dan sinar-X yang baru ditemukan. Suatu malam, ia kebetulan meninggalkan pelat

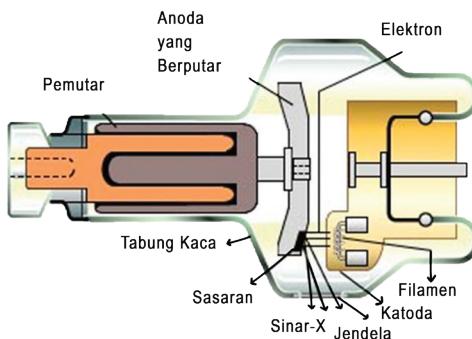
Hari berikutnya, Becquerel terkejut karena menemukan pelat fotografi telah digelapkan, tampaknya oleh radiasi spontan dari Uranium. Ia kemudian melanjutkan untuk menunjukkan bahwa radiasi baru ini dapat mengionisasi udara dan berbeda dari sinar-x karena dapat diblokkan oleh medan listrik dan magnet.



### Ayo, Cermati!

Penerapan sinar-x dalam kehidupan sehari-hari telah banyak digunakan, khususnya pada bidang kesehatan. Teknologi dalam pemanfaatannya sering memiliki dampak negatif, selain memberikan banyak dampak yang positif. Teknologi dapat bermanfaat, tapi juga dapat menimbulkan bahaya melalui resiko yang ditimbulkannya.

Amati Gambar 8.5 proses kerja sinar-x berikut!



Gambar 8.10 Prinsip kerja sinar-x  
sumber: unknown/iastate.edu(2022)

Seberkas elektron berenergi tinggi dipancarkan dengan memanaskan katoda (biasanya tembaga), yang kemudian berjalan menuju anoda yang berputar (biasanya tungsten) dan setelah menabrak anoda, berhenti total. Energi yang dilepaskan pada serangan semacam itu dilepaskan sebagai sinar-X, yang kemudian datang melalui jendela ke arah yang diinginkan.

Sinar-x berada pada rentang panjang gelombang 0,01 nanometer sampai 100 nanometer. Sinar-x yang memiliki Panjang gelombang 10 nanometer termasuk ke dalam sinar-x lembut, sedangkan sinar-x yang memiliki panjang gelombang 100 pikometer merupakan sinar-x keras.

Penggunaan sinar-x dalam kehidupan sehari-hari sangat beragam, antara lain: pencitraan media, keamanan, dan terapi radiasi.



## Proyek

1. Carilah bentuk penerapan sinar-x dalam kehidupan sehari-hari,
2. kemudian selidiki bagaimana cara kerja sinar-x pada penerapannya tersebut.
3. Cari tahu keuntungan dan resiko penggunaan sinar-x pada penerapan yang kalian pilih.
4. Tuangkan hasil pencarian dan penyelidikanmu dalam bentuk video dan laporan ilmiah.

## Rangkuman

1. Gejala kuantum merupakan salah satu cara mengidentifikasi karakteristik atom, salah satunya adalah elektron.
2. Gejala-gejala kuantum diawali dengan memahami konsep foton, kemudian diidentifikasi melalui eksperimen efek fotolistrik, efek Compton, serta aplikasinya pada sinar-x.
3. Energi radiasi gelombang elektromagnetik dipancarkan dalam bentuk diskrit, masing-masing diskrit ini disebut sebagai **kuantum**.
4. Paket-paket energi kecil yang dihasilkan dari cahaya yang berinteraksi dengan suatu materi disebut sebagai **foton**.
5. **Efek fotolistrik** terjadi Ketika cahaya mengenai suatu logam pada frekuensi dan beda potensial tertentu sehingga membuat elektron keluar dari logam tersebut.
6. **Efek Compton** menunjukkan hamburan cahaya yang menumbuk suatu elektron.

7. Hamburan cahaya pada efek Compton memiliki panjang gelombang yang lebih besar dibandingkan panjang gelombang cahaya sebelum menumbuk electron sehingga sebagian energi diserap oleh elektron yang dikenainya.
8. **Hipotesis De Broglie** menyatakan bahwa semua materi yang bergerak memiliki panjang gelombang.
9. **Sinar-x** merupakan salah satu gelombang elektromagnetik yang memiliki energi cukup tinggi pada rentang panjang gelombang  $10^{-8}$ - $10^{-12}$ m.

#### Asesmen

Selesaikan permasalahan berikut dengan baik dan benar!

1. Manakah dari teori berikut: teori cahaya, teori gelombang atau teori partikel, yang didukung oleh temuan Young, Maxwell, dan Hertz?
2. Manakah yang lebih berhasil melepaskan elektron dari permukaan logam: foton cahaya ungu atau foton cahaya merah? Berikan alasannya!
3. Sebuah elektron dan proton bergerak dengan kecepatan yang sama. Manakah yang memiliki momentum lebih besar? Manakah yang memiliki panjang gelombang lebih panjang?
4. Kita tidak dapat melihat panjang gelombang materi yang bergerak dalam keseharian kita. Apakah ini karena panjang gelombangnya luar biasa besar atau luar biasa kecilnya?
5. Seorang teman berkata, "Jika elektron bukan partikel, maka itu pasti gelombang." Apa tanggapan Anda? (Apakah Anda sering mendengar pernyataan "tidak tepat" seperti ini?).
6. Foton dengan panjang gelombang 0,06 nm mengalami hamburan Compton dengan sudut hamburan 60 derajat. Tentukan panjang gelombang foton yang dihamburkan!.

## Pengayaan



Gambar 8. 11. Sel surya

Sumber : Mj-Bird / Wikimedia Commons (2018)

Sel surya merupakan piranti semikonduktor yang menggunakan cahaya matahari untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit listrik tenaga surya disebut-sebut sebagai energi terbarukan masa depan yang mampu menggantikan pembangkit listrik bertenaga batu bara. Indonesia yang selalu mendapatkan cahaya Matahari sepanjang tahun memiliki peluang besar untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga surya agar dapat memenuhi kebutuhan masyarakat terhadap energi listrik.

Sebagai piranti semikonduktor, coba kalian analisis dari berbagai sumber dan diskusikan apakah prinsip kerja sel surya merupakan aplikasi dari efek fotolistrik yang sesuai dengan penjelasan Einsten pada Subbab B. Kemudian analisis juga bagaimana tantangan dan hambatan pengembangan pembangkit listrik tenaga surya di Indonesia.

## Refleksi

Setelah mempelajari Bab 8 Gejala Kuantum:

1. Apakah kalian menyadari manfaat fenomena gejala kuantum dalam kehidupan sehari-hari?

2. Apakah kalian sudah memahami konsep-konsep esensial dari gejala kuantum?
3. Apa yang akan kalian lakukan untuk meningkatkan pemahaman mengenai gejala kuantum ini?

KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI  
REPUBLIK INDONESIA 2022

Fisika untuk SMA/MA Kelas XII

Penulis : Irma Rahma Suwarma, Lia Laela Sarah

ISBN : 978-623-472-722-7 (jil.2)

Sumber: Getty/MarySan (2022)



# BAB 9

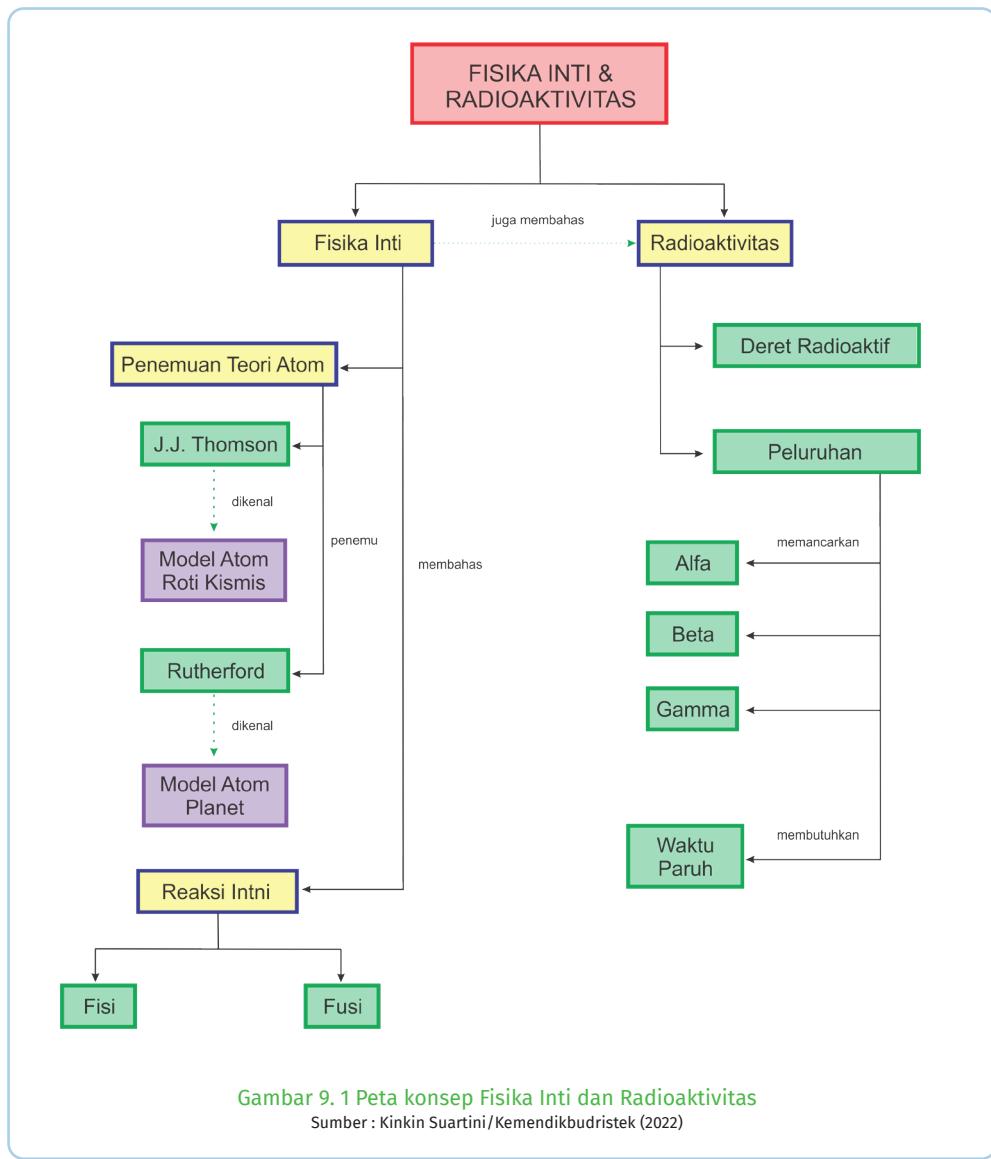
## FISIKA INTI DAN RADIOAKTIVITAS

### Kata Kunci

- Proton • Neutron • Elektron • Karakteristik inti • Defek massa • Energi ikat • Kestabilan inti
- Radioisotop • Peluruhan • Alfa • Beta • Gamma • Waktu paruh • Deret Radioaktif • Reaksi inti • Fisi
- Fusi • Energi reaksi

### Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, kalian dapat menganalisis karakteristik inti atom, proses peluruhan alfa, beta, gamma, radioaktivitas, dan penerapannya dalam kehidupan sehari-hari.



Gambar 9.1 Peta konsep Fisika Inti dan Radioaktivitas

Sumber : Kinkin Suartini/Kemendikbudristek (2022)

## A. Penemuan Inti Atom



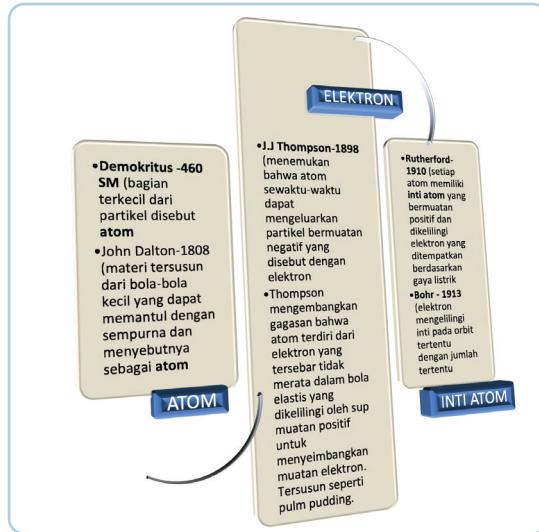
**Ayo, Bernalar Kritis!**

1. Bagaimana inti atom ditemukan?
2. Apa saja penyusun inti atom?
3. Apa karakteristik penyusun inti atom?
4. Bagaimana model inti atom?



Ayo, Cermati!

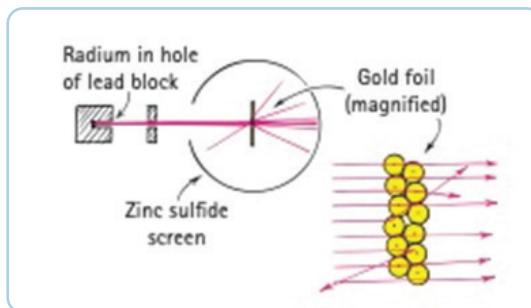
## 1. Sejarah Penemuan Inti Atom



Gambar 9. 2 Alur perkembangan penemuan atom

Sumber : Nanda Auliarahma/kemendikbudristek(2022)

Cermati Gambar 9.2, ceritakan kembali bagaimana sejarah perkembangan penemuan inti atom.

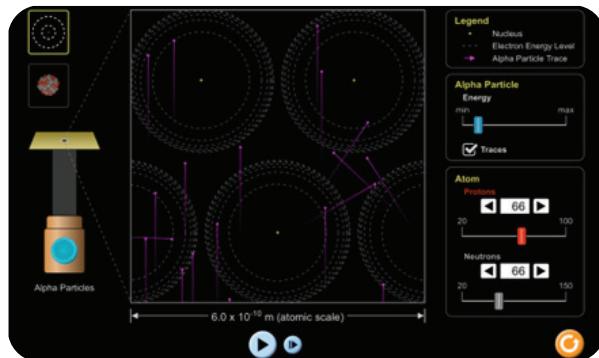


Gambar 9. 3 Percobaan lempeng emas Rutherford

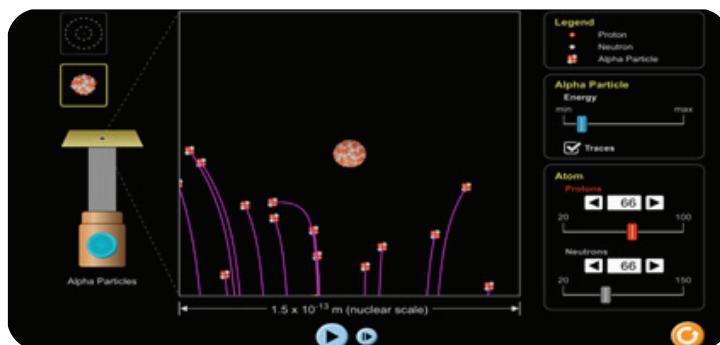
Sumber : Paul G. Hewitt/Conceptual Physics(2015)

Gambar 9.3 menunjukkan ilustrasi percobaan lempeng emas yang dilakukan oleh Hans Geiger (1882-1945) dan Ernest Marsden (1889-1970), kemudian Rutherford (1871-1937) pada 1911 menjelaskan hasil percobaan tersebut sebagai awal ditemukannya model inti atom yang sampai saat ini masih diyakini kebenarannya oleh para ilmuwan. Rutherford mengawali eksperimennya berdasarkan penemuan elektron oleh J.J Thomson (1856-1940). Ayo, lakukan simulasi percobaan Rutherford tersebut!

Kunjungi link:  
[https://phet.colorado.edu/sims/html/rutherford-scattering/latest/rutherford-scattering\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/rutherford-scattering/latest/rutherford-scattering_en.html)



- Set jumlah proton pada 40, tekan tombol “trace”, partikel alfa, dan play apa yang kalian amati dari lintasan gerak partikel alfa tersebut?
- Jika jumlah proton diatur pada angka 60, apa yang kamu
- Ubah ke dalam bentuk bola yang berwarna merah abu.



- Amati lintasan partikel alfa. Apa yang kalian temukan?
- Jika jumlah proton dinaikkan menjadi 100, apa yang kalian cermati pada lintasan partikel alfa?

Berdasarkan hasil pengamatanmu pada percobaan Rutherford, apa yang dapat kalian prediksi?

Percobaan Rutherford menembakkan seberkas partikel bermuatan positif (partikel alfa) dari sumber radioaktif diarahkan melalui selembar

lempeng emas yang sangat tipis. Partikel alfa ribuan kali lebih masif daripada elektron sehingga diharapkan aliran partikel alfa tidak akan terhambat saat melewati lautan elektron. Berdasarkan hasil eksperimen, hampir semua partikel alfa melewati lempeng emas dengan sedikit atau tanpa defleksi dan menghasilkan titik cahaya ketika mereka mengenai layar fluoresen di luar lempeng. Tapi beberapa partikel dibelokkan dari jalur garis lurusnya saat muncul. Beberapa partikel alfa dibelokkan dan ada sebagian kecil yang terpantulkan ke belakang.

Partikel alfa ini pasti menabrak sesuatu yang relatif kuat,tapi apa? Rutherford beralasan bahwa partikel yang tidak dibelokkan bergerak melalui ruang kosong di daerah lempeng emas. Sejumlah kecil partikel yang dibelokkan ditolak dari pusat inti bermuatan positif yang sangat padat. Oleh karena itu, Rutherford menyimpulkan bahwa setiap atom pasti memiliki inti yang seperti ini yang disebut sebagai inti atom.



#### Ayo, Cek Pemahaman!

1. Apa yang meyakinkan Rutherford bahwa kertas emas itu sebagian besar adalah ruang kosong?
2. Apa yang meyakinkan Rutherford bahwa partikel dalam kertas emas itu masif?

## 2. Karakteristik Inti Atom

Atom setiap unsur terdiri dari tiga partikel penyusun, yaitu proton, neutron, dan elektron. Sejak 1930-an para ilmuwan telah menemukan penyusun partikel inti yang lebih mikroskopik.

Atom tidak bermuatan karena mengandung **jumlah proton dan elektron** yang sama dan elektron tersebut berlawanan dengan muatan proton. Jika suatu atom kehilangan satu atau lebih elektron sehingga jumlah proton dan elektron tidak sama, maka atom tersebut akan berubah menjadi partikel yang bermuatan yang disebut dengan **ion**.

Inti atom di dalamnya terdapat sejumlah proton dan neutron yang disebut dengan **nukleon**. Proton dan neutron ini mengisi inti yang menunjukkan karakteristik suatu unsur dan disebut sebagai **nuklida**. Nuklida suatu unsur dilambangkan sebagai berikut.



$A$  = jumlah nukleon (proton + neutron) = nomor massa

$Z$  = jumlah proton = jumlah elektron = nomor atom

Suatu unsur akan berubah menjadi unsur lain jika jumlah  $Z$  (jumlah proton) berubah sehingga lambang X juga berubah.



#### Ayo, Cermati!

Carilah informasi dari berbagai sumber mengenai proton, neutron, dan elektron. Identifikasi dan jelaskan perbedaan serta proton, neutron, dan elektron berdasarkan penyusunnya, sifat penyusunnya, dan gaya interaksi yang dimilikinya.

Karakteristik lain dari inti atom dapat dilihat dari massa. Massa atom dan partikel penyusunnya lebih mudah dinyatakan dalam satuan massa atom ( $u$ ) daripada satuan SI massa kilogram. ( $1 u = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ). Satuan massa atom ini sering juga disingkat menjadi "sma".

Proton dan neutron keduanya memiliki massa sekitar satu satuan massa atom  $u$ . Massa elektron sangat kecil, sekitar  $0.0005 u$ . Oleh karena itu, sebagian besar massa atom berada di dalam inti. Karakteristik inti atom berdasarkan massanya dijelaskan pada Tabel 9.1.

Tabel 9.1 Karakteristik inti atom berdasarkan massanya

	massa/sma	muatan	posisi
proton	1,0773	$+e$	dalam inti
neutron	1,0087	0	dalam inti
elektron	0,00056	$-e$	mengorbit inti



#### Ayo, Cek Pemahaman!

Inti Natrium diwakili oleh lambang

Jelaskan karakteristik dan jumlah proton dan neutron Natrium!

## B. Defek Massa dan Energi Ikat

Proton dan neutron di dalam inti berikatan sangat kuat, sehingga memerlukan energi yang sangat besar untuk memisahkannya.



### Ayo, Bernalar Kritis!

Apa yang menyebabkan proton dan neutron berikatan sangat kuat?

Apakah massa masing-masing partikel penyusun atom ketika dijumlahkan sama dengan massa atom tersebut?



### Ayo, Cermati!

Isilah Tabel 9.3 dengan menggunakan data pada Tabel 9.2.

Tabel. 9.2 Massa beberapa unsur

Unsur	Massa(sma)
N	12.018613
O	14.008595
Al	23.999941
proton	1,0773
neutron	1,0087

sma = satuan massa atom, didefinisikan sebagai 1/12 massa 1 atom karbon.

$$1 \text{ sma} = 1,66053 \times 10^{-27} = 931,49 \text{ MeV/c}^2$$

Tabel. 9.3 Total massa beberapa unsur

Unsur	Jumlah Proton (Z) (a)	Nomer Massa (A) (b)	Jumlah Neutron (c)	Jumlah Proton x Massa Proton (d)	Jumlah Neutron x Massa Neutron (e)	Total Massa (d+e)
N	7	12				
O	8	14				
Al	13	24				

Identifikasi data hasil perhitunganmu, bandingkan total massa yang kamu hitung ( $d+e$ ) dengan data massa unsur pada tabel 9.2. Bagaimana menurut pendapatmu? Tuliskan hasil penilaian kalian setelah membandingkan data tersebut. Kalian dapat menambahkan ilustrasi gambar pada penjelasanmu.

Mengapa terjadi perbedaan antara massa suatu unsur dengan jumlah massa dari masing-masing partikel penyusunnya? Proton dan neutron berikatan sangat kuat di dalam inti sehingga kita memerlukan energi untuk melepaskan ikatannya. Berapakah besar energi ikat yang dimiliki inti? Secara logika tentu saja ukurannya sebesar energi yang kita perlukan untuk melepaskan ikatan tersebut.

Besarnya energi ikat pada inti dapat dihitung berdasarkan perbedaan massa antara massa unsur dan jumlah massa proton dan neutron dalam inti karena massa yang hilang pada inti tersebut dikonversi ke dalam bentuk energi ikat. Oleh karena itu, jika suatu nuklida dengan lambang  ${}^A_Z X$  memiliki massa  $M$ , massa neutron  $m_n$  dan massa proton  $m_p$ , maka energi ikat nuklida tersebut dapat dihitung sebagai berikut.

Persamaan reaksi:

*“Nuklida  ${}^A_Z X$  memiliki sejumlah proton dan sejumlah neutron disertai defek massa (massa yang hilang)”*

Secara matematis pernyataan tersebut dapat dituliskan:

Nuklida  ${}^A_Z X$  = jumlah proton + jumlah neutron + defek massa

$${}^A_Z X \rightarrow Zm_p + Nm_n + \Delta m$$

$$\Delta m = M - Zm_p - Nm_n$$

Besar energi ikat:

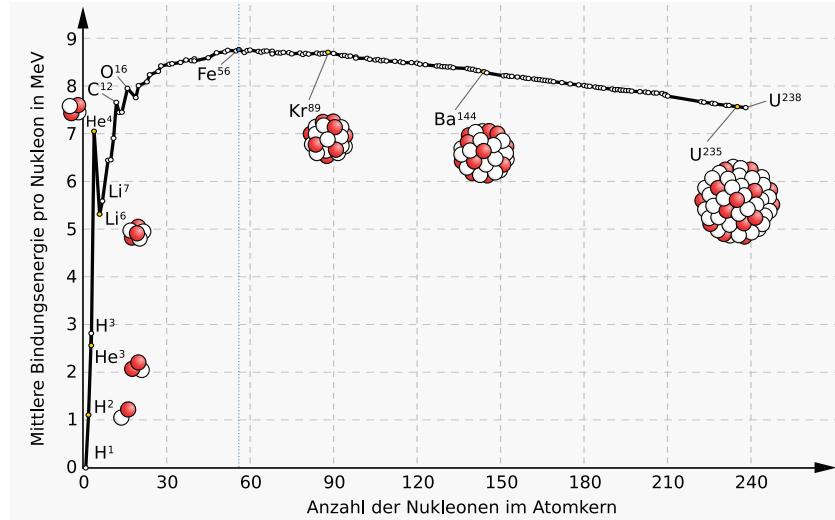
$$E_B = \Delta mc^2$$

$$E_B = (M - Zm_p - Nm_n)c^2$$

\*catat:  $c^2 = 931 \text{ MeV/sma}$  di mana  $1 \text{ sma} = 931 \text{ MeV/c}^2$

- Bagaimana kecenderungan energi ikat yang dimiliki oleh suatu unsur?

- Apakah unsur ringan yang memiliki nomor massa kecil akan memiliki energi ikat yang kecil?
- Interpretasikan grafik pada Gambar 9.5!
- Tuliskan hasil interpretasimu!



Gambar 9.5 Grafik energi ikat per nukeon( $E_0/A$ ) terhadap nomermassa (A)

Sumber: MikeRun/Wikimedia Commons(2022)

Partikel-partikel dalam inti atom yang memiliki nomer massa (A) besar pada umumnya memiliki energi ikat yang sangat besar sehingga untuk melepaskan ikatan antar partikel diperlukan “penganggu” ikatan tersebut. Gangguan ini biasanya dilakukan melalui penembakan neutron pada inti atom, seperti salah satu contohnya adalah reaksi fisi pada Uranium. Isilah nilai kosong pada Tabel 9.4 agar kalian dapat memahami cara menghitung energi ikat pada suatu reaksi inti.

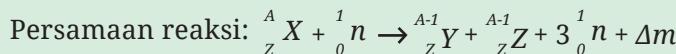
Tabel 9.4 Energi ikat inti

Reaksi	$^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{143}\text{Ba} + ^{90}\text{Kr} + 3n + \Delta m$
Persamaan massa (m)	$235.04393 + 1(1.008665) = 142.92063 + 89.91952 + 3(1.008665) + \Delta m$
Massa yang hilang	$\Delta m = (235.04393 + 1.008665) - (142.92063 + 89.91952 + 3(1.008665))$ = . sma
Energi yang diperoleh (E)	$\Delta E = \Delta mc^2$ = . MeV

Energi yang diperoleh / nukleon	$\Delta E/236 =$
---------------------------------	------------------

Ingat: 1 sma = 931 MeV/c<sup>2</sup>

Berdasarkan hasil perhitungan yang kalian kerjakan, rumuskan energi ikat tersebut secara umum:



$$\Delta EB = (. )c^2 - (. )c^2$$



#### 5.4 Ayo, Cek Pemahaman!

1. Jika neutron dan proton yang terisolasi dalam inti memiliki massa lebih dari 10.000 amu, mengapa 12 neutron dan proton pada inti Carbon memiliki massa yang tidak lebih besar dari 120.000 amu?
2. “Ketika suatu unsur berat, misalnya uranium mengalami reaksi fisi, maka jumlah nukleon akan berkurang setelah reaksi tersebut” Apakah menurutmu pernyataan tersebut benar? Berikan penjelasanmu!

## C. Radioaktivitas

### Isotop dan Kestabilan Inti



#### Ayo, Bernalar Kritis!

Apa jumlah proton dan neutron setiap nuklida sama?

Apa yang menyebabkan suatu partikel tidak stabil?

Apakah semua partikel tidak stabil?

Beberapa Nuklida sejenis memiliki nukleon yang berbeda, seperti contohnya  ${}_{28}^{55}Ni$ ,  ${}_{28}^{56}Ni$ ,  ${}_{28}^{57}Ni$ , dan ada pula nuklida  ${}_{19}^{37}K$ ,  ${}_{19}^{38}K$ ,  ${}_{19}^{39}K$ . Mari kita cermati perbedaan nuklida-nuklida tersebut. Identifikasi Tabel 9.5. Isilah jumlah proton, neutron dan elektron untuk masing-masing nuklida pada Tabel 9.5.



### Ayo, Cermati!

Tabel 9.5 Identifikasi isotop

Nuklida	Proton	Neutron	Elektron
$^{55}_{28}Ni$	28	27	28
$^{56}_{28}Ni$		28	
$^{57}_{28}Ni$	28		
$^{37}_{19}K$	19	18	19
$^{38}_{19}K$			
$^{39}_{19}K$		20	

Setelah menghitung jumlah proton, neutron, dan elektron pada nuklida (Tabel 9.5) apa nilai yang sama pada masing-masing nuklida tersebut? Ya, jumlah proton nuklida tersebut sama, sehingga dinamakan sebagai isotop.

Perbedaan apa yang dapat kalian temukan dari Tabel 9.5? Nuklida dengan nukleon yang lebih banyak memiliki volume yang lebih besar. Jumlah neutron semakin banyak pada nuklida yang memiliki nukleon lebih banyak. Gaya ikat inti tidak dapat menjangkau volume nukleon yang semakin besar. Oleh karena itu, neutron pada inti yang lebih berat cenderung mudah untuk dilepaskan. Keadaan ini membuat isotop dengan nukleon yang lebih banyak cenderung tidak stabil, sedangkan isotop dengan nukleon relatif sedikit cenderung lebih stabil.

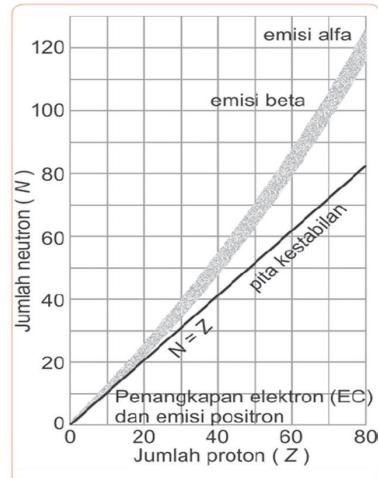
Tabel 9.6 Nilai Z dan N beberapa unsur

Z	N	unsur	Letak/posisi
10	10	$^{20}_{10}Ne$	Segaris dengan pita kestabilan
20	20		
40	47		
60	79		
80	113		

Kestabilan inti bergantung pada besarnya energi ikat yang dimiliki oleh inti. Isotop yang memiliki nukleon lebih banyak (inti berat) cenderung tidak stabil.

Perhatikan Gambar 9.6, coba cermati garis pita kestabilan ( $N=Z$ ) pada grafik, dan isikan nama unsur dengan jumlah N dan Z sesuai pada Tabel 9.6!

Berdasarkan hasil analisis grafik, apa hasil interpretasimu? Ya, benar. Unsur-unsur dengan inti ringan (inti yang mempunyai  $Z < 20$ ) terletak segaris dengan pita kestabilan, artinya unsur-unsur ini merupakan unsur yang stabil. Sementara unsur-unsur inti berat ( $Z>20$ ) terletak di atas pita kestabilan, artinya unsur-unsur ini cenderung tidak stabil dan menghasilkan pancaran radiasi emisi beta atau emisi alfa.



Gambar 9.6 Grafik pita kestabilan  
Sumber : unknown/naifun.com(2022)



#### Ayo, Cek Pemahaman!

Terdapat sebuah nuklida,  $^{201}_{82}Pb$  tentukan:

- Berapa defek massa nuklida tersebut?
- Berapa energi ikat unsur nuklida tersebut?
- Dimanakah letak nuklida tersebut pada grafik pita kestabilan?
- Apa interpretasimu terhadap nuklida tersebut?

## D. Partikel Radiasi



#### Ayo, Bernalar Kritis!

Apa yang akan dilakukan inti agar dirinya stabil? Bagaimana proses pelepasan partikel dari suatu inti? Bagaimana karakteristik partikel radiasi?

Isotop yang tidak stabil, cenderung akan membuat dirinya stabil dengan melepaskan nukleon (proton+neutron) yang disebut dengan peristiwa **peluruhan**. Proses peluruhan ini dapat terjadi baik secara alamiah maupun secara buatan (dengan perlakuan tertentu). Isotop-isotop tersebut harus

melepaskan nukleon, maka proses peluruhan itu melepaskan partikel-partikel baru dan juga unsur yang baru. Partikel-partikel tersebut dinamakan partikel radiasi yang terdiri dari partikel neutron, proton, deuteron, triton, sinar alfa, sinar beta, positron, atau sinar gamma.

Partikel radiasi tersebut memiliki karakteristik yang berbeda. Kemampuan daya tembus suatu partikel dipengaruhi oleh berbagai faktor fisis misalnya massa, muatan, energi, dan lain-lain. Hal tersebut yang mempengaruhi ukuran suatu partikel.

Semakin kecil ukuran suatu partikel radiasi, maka semakin besar daya tembusnya.

Satuan dosis radiasi umumnya dinyatakan dalam **rad** (dosis serapan radiasi). 1 rad sebanding dengan 0,01 joule radiasi energi yang diserap per 1 kilogram jaringan. Satuan dosis radiasi ini dapat digunakan untuk mengukur kerusakan yang ditimbulkan bagi lingkungan sekitar, bukan hanya semata memberikan informasi energi radiasi.



#### 9.4 Ayo, Cermati!

Coba kalian amati informasi yang disajikan pada Tabel 9.7 kemudian identifikasi dan buatlah kesimpulan hasil identifikasi dan analisismu terhadap Tabel 9.7.

Tabel 9.7 Karakteristik partikel radiasi

Karakteristik	Partikel Alfa	Partikel Beta Negatif	Partikel Beta Positif	Radiasi Gamma
Massa	$4 \text{ u}$	Kurang lebih $\text{u}/2000$	Kurang lebih $\text{u}/2000$	0
Muatan	$+2e$	$-e$	$+e$	0
Bentuk	Inti helium (2 proton dan 2 neutron)	elektron	positron	gelombang elektromagnetik yang termasuk ke dalam gelombang pendek
Kecepatan	Hingga $0.05c$	Hingga $0.99c$	Hingga $0.99c$	c

Mempengaruhi Plat Film?	iya	iya	iya	iya
-------------------------	-----	-----	-----	-----

Tulis kesimpulanmu di sini berdasarkan jawaban dari pertanyaan berikut:

1. Apa perbedaan partikel-partikel radiasi tersebut?
2. Apa persamaan partikel-partikel tersebut?
3. Partikel mana yang memiliki ukuran terkecil?

Aktivitas peluruhan memiliki ukuran seberapa banyak partikel itu meluruh. Ukuran ini dinyatakan dengan laju radiasi. Makin cepat laju, makin cepat kestabilan inti baru tercapai. Faktor yang mempengaruhi laju radiasi adalah jumlah nuklida dan konstanta peluruhan. Dinyatakan dengan rumus:

$$A = \lambda N \dots\dots\dots(4)$$

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda dt \dots\dots\dots(6)$$

A = aktivitas peluruhan(kejadian per detik atau Bequerel disingkat Bq)

$\lambda$  = konstanta peluruhan

N = jumlah partikel (N = mol x NA, NA = bilangan Avogadro  $6,02 \times 10^{23}$ ).

Satuan aktivitas yang sering digunakan adalah Curie (Ci), 1 Ci =  $3,70 \times 10^{10}$  Bq. Aktivitas radioisotop tidak bersifat tetap dan akan makin berkurang selama proses mencapai kestabilan. Akibat dari berkurangnya aktivitas peluruhan tersebut, maka pada suatu waktu tertentu akan mencapai nilai setengahnya. Waktu yang diperlukan untuk mencapai nilai setengahnya itu disebut dengan **waktu paruh**. Jumlah atom yang belum meluruh N(t) pada waktu (t) sama dengan:

$$N(t) = N_0 e^{-0,693 t / t_{1/2}} \dots\dots(7)$$

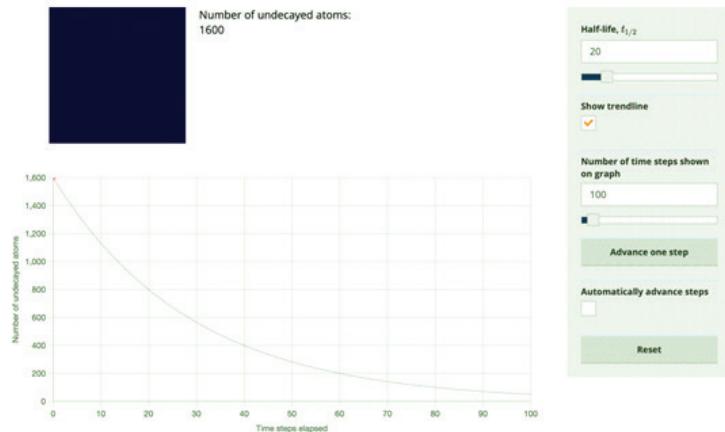


#### 9.5 Ayo, Cermati!

Mari, kita buktikan bagaimana bentuk kurva persamaan tersebut dengan mengerjakan simulasi pada:



<https://academo.org/demos/radioactive-decay-simulator/>



1. Masukan nilai waktu paruh ( $t_{1/2}$ ) yang kalian inginkan.
2. Tentukan nilai rentang waktu yang akan ditunjukkan pada grafik.
3. Tekan tombol ‘advance one step’ untuk melihat peluruhan pada rentang waktu tertentu.



Ayo, Cermati!

Perubahan nilai jumlah atom yang belum meluruh terhadap langkah waktu yang telah kalian tentukan.

1. Apakah ketika langkah pertama jumlah atom yang belum meluruh adalah setengah dari jumlah awal?
2. Jika tidak, kapan nilai tersebut akan berkurang menjadi setengahnya?
3. Apakah sudah sesuai dengan waktu paruh yang kalian tentukan?
4. Apa manfaat waktu paruh?

Tulis jawaban pertanyaan-pertanyaan tersebut!

Berdasarkan konsep waktu paruh, para ilmuwan dapat menghitung usia artefak yang mengandung karbon, seperti perkakas kayu atau kerangka dengan mengukur tingkat radioaktivitasnya saat ini. Proses ini, dikenal sebagai penanggalan karbon yang memungkinkan kita untuk menyelidiki hingga 50.000 tahun yang lalu. Luar rentang waktu ini, hanya sedikit karbon-14 yang tersisa untuk memungkinkan analisis yang akurat.

Penanggulan karbon-14 akan menjadi metode penanggulan yang relatif sederhana dan akurat jika jumlah karbon radioaktif di atmosfer konstan selama berabad-abad. Fluktuasi medan magnet Matahari serta perubahan kekuatan medan magnet Bumi mempengaruhi intensitas sinar kosmik di atmosfer Bumi yang pada gilirannya menghasilkan fluktuasi produksi C-14. Selain itu, perubahan iklim Bumi mempengaruhi jumlah karbon dioksida di atmosfer. Lautan adalah reservoir besar karbon dioksida.

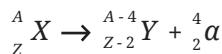
## E. Peluruhan Radioaktif

### 1. Peluruhan Alfa ( $\alpha$ )

Peluruhan partikel alfa ( $\alpha$ ) pada umumnya terjadi ketika inti berat (dengan nomer atom Bismuth 86 sampai Radon 92) melepaskan partikel alfa untuk membuat dirinya stabil. Partikel alfa ini memiliki kecepatan hingga 5% dari kecepatan cahaya dan memiliki daya tembus yang lemah hanya dapat menembus kertas yang sangat tipis.

Partikel- $\alpha$  memiliki massa dan muatan yang relatif besar, akibatnya partikel ini memiliki kemampuan yang sangat besar untuk mengionisasi. Partikel- $\alpha$  dapat menghasilkan sebanyak 105 pasangan ion untuk setiap sentimeter udara yang dilaluinya. Dengan demikian, partikel- $\alpha$  relatif cepat mengalami kehilangan energi dan memiliki daya tembus yang rendah.

Persamaan reaksi peluruhan alfa:



Energi dibebaskan dalam peluruhan karena inti hasil peluruhan terikat lebih erat dari pada inti semula. Total energi peluruhan dihitung menggunakan persamaan:

$$Q = (m_x - m_y - m_\alpha)c^2$$

Energi yang dibebaskan muncul sebagai energi kinetik partikel alfa  $K_\alpha$  dan energi kinetik inti anak (inti hasil)  $K_Y$  yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$Q = K_Y + K_\alpha$$

Asumsikan kita memilih kerangka acuan laboratorium (dijelaskan pada reaksi inti). Selanjutnya, kita dapat menghitung energi kinetik alfa dengan persamaan:

$$K_\alpha = ((A-4)/A)Q$$

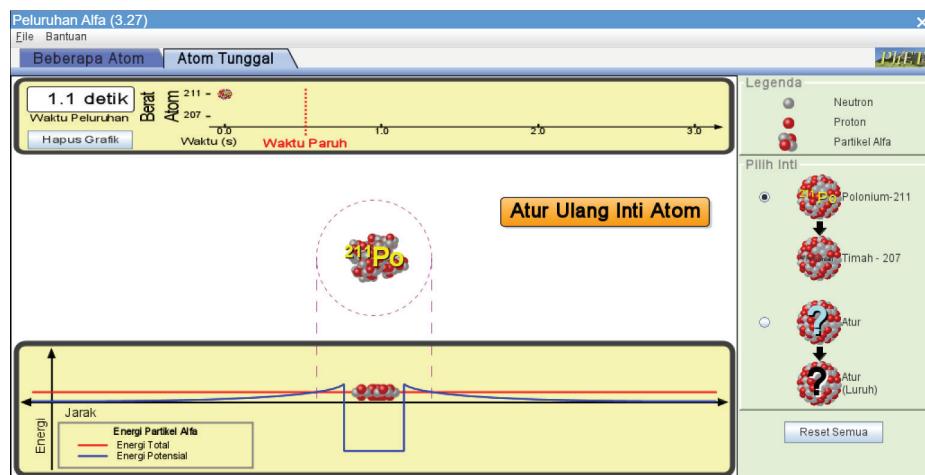
Peluruhan alfa merupakan salah satu peristiwa efek trobosan (*tunneling effect*), seperti dibahas dalam mekanika kuantum. Inti partikel alfa terikat oleh gaya inti yang sangat kuat. Hanya saja, jika partikel alfa inti bergerak lebih jauh dari jari-jari inti ia akan segera merasakan tolakan gaya Coulomb.



### 9.6 Ayo, Cermati!

Buka simulasi PhET mengenai peluruhan alfa berikut:

<https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/nuclear-physics/latest/nuclear-physics.html?simulation=alpha-decay&locale=id>



Amati simulasi tersebut, kemudian berikan interpretasimu!

Berdasarkan hasil eksperimen diketahui bahwa kecepatan gerak partikel alfa berkisar antara  $0,054 c$  hingga  $0,07 c$ . Massa partikel alfa cukup besar, yaitu  $4 u$  sehingga jangkauan partikel alfa sangat pendek. Partikel alfa dengan energi paling tinggi, jangkauannya di udara hanya beberapa cm dan dalam bahan hanya beberapa mikron.

Partikel alfa yang dipancarkan oleh sumber radioaktif memiliki energi tunggal (*mono-energetic*). Bertambah tebalnya bahan hanya akan mengurangi

energi partikel alfa yang melintas, tapi tidak megurangi jumlah partikel alfa itu sendiri.

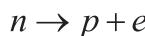


VIDEO kamar kabut wilson

Pengujian jejak partikel alfa dengan kamar kabut Wilson, menunjukkan bahwa sebagian besar partikel alfa memiliki jangkauan yang sama di dalam gas dan bergerak dengan jejak lurus.

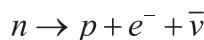
## 2. Peluruhan Beta ( $\beta$ )

Peluruhan beta membuat sebuah proton berubah menjadi inti atau sebaliknya. Jadi Z dan N masing-masing berubah satu satuan, tapi A tidak berubah. Peluruhan beta terjadi pada sebuah inti atom. Saat pemancaran e sebuah inti atom dengan Z proton dan N neutron meluruh ke inti atom lain dengan Z + 1 proton dan N - 1 neutron.

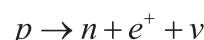


Proses peluruhan ini ketika pertama kali dipelajari, partikel yang dipancarkan disebut partikel beta, kemudian baru diketahui bahwa partikel itu adalah elektron. Proses peluruhan beta terdiri dari berbagai jenis, yaitu sebagai berikut.

- Peluruhan neutron:

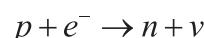


- Proses peluruhan beta lainnya adalah peluruhan proton yang reaksinya:



$e^+$  adalah elektron positif atau positron yang merupakan antipartikel dari elektron. Positron memiliki massa sama dengan elektron, tetapi memiliki muatan elektrik yang berlawanan. Jika **positron bertemu dengan elektron, keduanya akan bergabung dan musnah**. Proses ini dinamakan **annihilasi**. Energi keduanya berubah menjadi gelombang elektromagnetik.

- Salah satu proses peluruhan inti adalah tangkapan elektron (Electron capture, EC). Proses reaksinya adalah



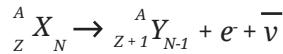
Sebuah proton di sini menangkap elektron dari orbitnya beralih menjadi sebuah neutron ditambah sebuah neutrino. Elektron yang ditangkap ini adalah elektron terdalam sebuah atom dan proses ini dicirikan dengan kulit asal elektronnya: tangkapan kulit K, kulit L, dan seterusnya. Tangkapan elektron ini tidak terjadi pada proton bebas, tapi hanya proton yang ada di dalam inti.



### 9.7 Ayo, Cermati!

Isilah tabel di bawah ini untuk memahami cara menghitung nilai energi peluruhan beta!

Persamaan reaksi



Persamaan energi

$$E=mc^2$$

$$Ek_x = Ek_y + Ek_e + Q$$

Nilai  $Q$  dari peluruhan ini, dihitung dengan mengurangi massa-massa elektron ( $Zm_e$ )

Persamaan massa (m) dan energi

$$(m_x - Zm_e)c^2 = (m_y - (Z+1)m_e)c^2 + m_e c^2 + Q$$

Nilai  $Q$

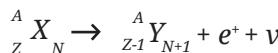
$$Q =$$



#### 5.4 Ayo, Cek Pemahaman!

Gunakan cara yang sama, tentukan energi disintegrasi ( $Q$ ) dari bentuk peluruhan elektron lainnya!

Persamaan reaksi pemancaran positron



Persamaan energi

$$E=mc^2$$

$$Ek_x = Ek_y + Ek_e + Q$$

Nilai  $Q$  dari peluruhan ini, dihitung dengan mengurangi massa-massa elektron ( $Zm_e$ )

Persamaan massa (m) dan energi

$$Q =$$

**Persamaan reaksi penangkapan elektron**



Persamaan energi

$$E =$$

Persamaan massa dan energi

Nilai Q

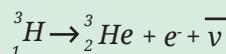

Setelah menyelesaikan penurunan rumus tersebut, bagaimana contoh kasus penyelesaian masalah yang biasanya ditemui dalam kehidupan sehari-hari? Cermatilah contoh dibawah ini.

Contoh

Berapakah energi maksimum elektron yang teremisi dalam peluruhan e dalam atom H?

Jawab:

Reaksi peluruhan:

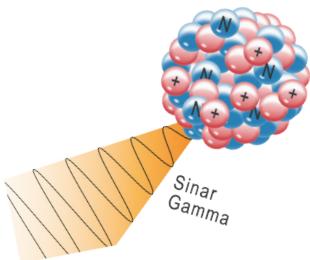


$$Q = (m_H - m_{He})c^2 = (3,016050u - 3,01603u) \times 931,5 \text{ MeV/u} = 0,0186 \text{ MeV}$$

Energi kinetik inti He bisa diabaikan karena terlalu kecil sehingga  $K_e$  terjadi pada saat  $K_v = 0$ , maka  $K_e = 0,0186 \text{ MeV}$ .

### 3. Radiasi Sinar Gamma ( $\gamma$ )

Sebuah sinar gamma merupakan suatu energi foton yang tinggi. Gamma tidak bermuatan, energinya murni dan juga tidak bermassa.



Gambar 9.7 Peluruhan Gamma  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistik (2022)

Setelah proses peluruhan, inti atom sering kali berada pada keadaan ‘tereksitas’. Hal ini berarti proses peluruhan telah menghasilkan sebuah inti yang masih mempunyai kelebihan energi untuk meninggalkan inti. Oleh karena itu, emisi sinar gamma merupakan suatu cara bagi inti yang berenergi tinggi untuk mengurangi energinya agar lebih stabil.

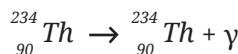
Proses peluruhan alfa dapat dijelaskan oleh teori yang menyatakan bahwa energi terkuantisasi dalam level/tingkat atom. Energi dihasilkan dalam jumlah diskrit yang disebut kuanta. Bahkan jika jika sejumlah energi tinggi dihasilkan secara bersamaan, maka pelepasan kelebihan energi akan mudah terjadi. Oleh karena itu, selain memberikan kelebihan energinya dengan beta atau alfa, sisanya inti juga melepaskan gamma. Gambar 9.7 adalah ilustrasi pemancaran sinar gamma dalam peluruhan gamma. Sebuah

inti dalam peluruhan gamma berubah dari keadaan energi yang lebih tinggi ke keadaan energi yang lebih rendah melalui emisi radiasi elektromagnetik (foton).

### Karakteristik Sinar Gamma

- a. Foton gamma tidak bermassa dan bermuatan, mereka murni energi elektromagnetik.
- b. Panjang gelombangnya pendek dan frekuensinya tinggi, hal ini menunjukkan betapa cepat dan tingginya energi gamma.
- c. Jumlah proton dan neutron pada proses ini dalam inti tidak berubah sehingga inti induk dan anaknya merupakan unsur kimia yang sama.
- d. Intensitas radiasi gamma yang tinggi dapat membunuh sel hidup. Energi radiasi yang tinggi membunuh sel-sel dengan cara menghancurkan DNA sehingga menutup kemampuan sel untuk tumbuh dan berkembang.
- e. Dibutuhkan beton yang tebal untuk menghentikan radiasi sinar gamma. Selain dari beton, timbal (Pb) mempunyai kerapatan yang tinggi sehingga dapat digunakan sebagai penghalang radioaktif.
- f. Mempunyai sifat ionisasi yang rendah karena tidak bermassa dan bermuatan.

Contoh reaksi nuklir yang menghasilkan sinar gamma:  
Peluruhan  $\gamma$



Sebuah sinar gamma dilepaskan menuju tingkat energi Thorium yang lebih rendah. Seperti yang terlihat, nomor massa dan nomor atom Thorium tidak berubah, hanya saja sisi sebelah kanan dari persamaan reaksi di atas menjadi lebih stabil.

## F. Reaksi Inti (Fisi dan Fusii)



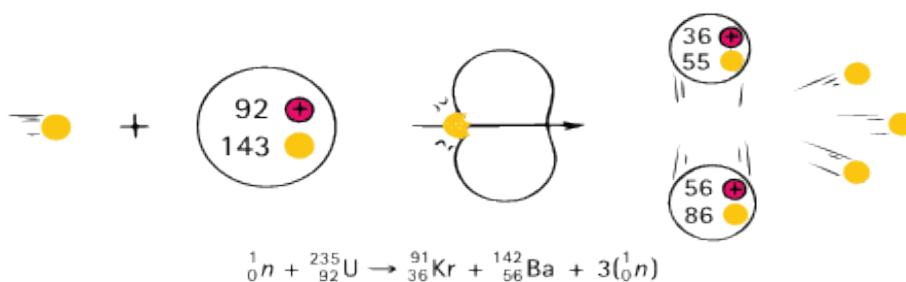
Ayo, Bernalar Kritis!

Bagaimana proses reaksi dalam inti?  
Apakah bentuk reaksi ini mempengaruhi bentuk peluruhan dan pembentukan unsur radioaktif yang baru?  
Apa manfaat reaksi tersebut dalam kehidupan kita?

Proses pelepasan partikel radiasi dari inti dapat terjadi secara alamiah maupun buatan (bantuan manusia). Proses tersebut secara umum dapat dikelompokan menjadi dua reaksi, yaitu reaksi fisi dan reaksi fusi.

## 1. Reaksi Fisi

Fisi nuklir melibatkan keseimbangan antara daya tarik nuklir dan tolakan listrik antara proton di dalam nukleus. Proses fisi yang dihasilkan dapat menghasilkan banyak kombinasi berbeda dari inti yang lebih kecil. Contoh reaksi fisi diilustrasikan pada Gambar 9.8.



Gambar 9.8 Contoh Reaksi Fisi  
Sumber : Paul G. Hewitt/Conceptual Physics(2015)

Nuklida dibelah biasanya dengan menggunakan peluru neutron. Neutron dipilih karena tidak bermuatan listrik sehingga mampu menerobos masuk ke dalam inti tanpa hambatan elektrostatik oleh elektron di luar inti. Oleh karena itu, bentuk reaksi fisi dicirikan adanya neutron di sisi kiri persamaan reaksi. Nuklida dibelah biasanya dengan menggunakan peluru neutron. Neutron dipilih karena tidak bermuatan listrik sehingga mampu menerobos masuk ke dalam inti tanpa hambatan elektrostatik oleh elektron di luar inti. Oleh karena itu, bentuk reaksi fisi dicirikan adanya neutron di sisi kiri persamaan reaksi.



### 9.8 Ayo, Cermati Teks di Bawah Ini!

Neptunium dihasilkan ketika neutron diserap oleh inti U-238. Alih-alih mengalami fisi, nukleus memancarkan partikel beta dan menjadi Neptunium-239, sebuah isotop elemen berikutnya dalam tabel periodik. Waktu paruhnya hanya 2,4 hari, jadi tidak terlalu lama. Neptunium-239 adalah pemancar beta dan kemudian akan meluruh menjadi Plutonium-239 yang memiliki waktu paruh sekitar 24.000 tahun.

Unsur Plutonium secara kimiawi beracun sama seperti timbal dan arsenik. Plutonium dapat menyerang sistem saraf dan dapat menyebabkan kelumpuhan. Kematian bisa menyusul jika dosisnya cukup besar. Untungnya, plutonium tidak bertahan lama dalam bentuk unsurnya karena dengan cepat bergabung dengan oksigen untuk membentuk tiga senyawa: PuO, PuO<sub>2</sub>, dan Pu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang semuanya secara kimiawi relatif tidak berbahaya. Mereka tidak akan larut dalam air atau dalam sistem biologis. Senyawa plutonium ini tidak menyerang sistem saraf dan terbukti tidak berbahaya secara kimiawi.

Plutonium dalam bentuk apapun, merupakan radioaktif beracun. Ini lebih beracun daripada Uranium, meskipun kurang beracun daripada Radium. Plutonium memancarkan partikel alfa berenergi tinggi yang membunuh sel dan menimbulkan mutasi. Menariknya, sel-sel yang rusak lebih berkontribusi terhadap aktifnya sel kanker daripada sel-sel mati. Inilah sebabnya mengapa peringkat Plutonium relatif rendah sebagai zat penghasil kanker. Bahaya terbesar Plutonium bagi manusia adalah potensinya untuk digunakan dalam bom fisi nuklir. Kegunaannya adalah pada reaktor fisi—khususnya reaktor breeder.

1. Berdasarkan teks tersebut, mengapa Plutonium tidak muncul dalam jumlah yang cukup besar dalam bentuk bijih alami?
2. Gambarkan reaksi fisi dari pembentukan Plutonium tersebut

## 2. Reaksi Fusi

Reaksi fusi merupakan reaksi penggabungan inti atom. Penggabungan inti ini merupakan kebalikan dari fisi nuklir. Jika dua inti kecil bergabung, massa inti yang menyatu akan lebih kecil daripada massa dua inti tunggal sebelum fusi. Energi dilepaskan sebagai inti ringan. Reaksi fisi mengubah jumlah materi menjadi energi sekitar 0,1%. Sedangkan dalam reaksi fusi, jumlah materi yang diubah menjadi energi bisa sampai 0,7%. Hal tersebut berlaku pada proses yang berlangsung pada bom, reaktor, atau bintang. Sebagian besar reaksi menghasilkan sepasang partikel — misalnya, pasangan inti Deuterium dapat menghasilkan inti Helium-3 dan neutron bukan menghasilkan inti helium-4 tunggal. Jika dihasilkan inti tunggal sebagai hasil reaksi, maka hal itu tidak sesuai dengan kekekalan momentum dan energi.



### 9.9 Ayo, Cermati!

Isilah tabel berikut untuk menghitung energi yang dihasilkan pada reaksi fusi.

Persamaan reaksi	${}^2H + {}^3H \rightarrow {}^4He + n + \Delta m$
Persamaan massa (m)	$m({}^2H) + m({}^3H) = m({}^4He) + m_n + \Delta m$ $(.) + (.) = (.) + (.) + \Delta m$
Defek massa	$\Delta m =$
Energi	$\begin{aligned} E &= mc^2 \\ &= \Delta m c^2 \\ &= ( \text{sma} ) \times 931 \text{ MeV/sma} \\ &= \text{MeV} \end{aligned}$

Bom Hidrogen adalah contoh dari penemuan reaksi nuklir yang bertujuan untuk merusak. Pemanfaatan nuklir yang dapat memberikan dampak positif bagi manusia adalah pelepasan terkontrol dari sejumlah besar energi nuklir tersebut.



### Ayo, Bernalar Kritis!

#### Proyek Penguatan Profil Pelajar Pancasila (P5)

Banyak sekali pendapat pro dan kontra mengenai pengembangan reaktor nuklir. Hal tersebut tidak terlepas dari beberapa bencana yang terjadi akibat kebocoran reaktor nuklir. Walaupun demikian, banyak pula manfaat reaktor nuklir tersebut, khususnya dalam menciptakan unsur-unsur baru yang bermanfaat dalam kehidupan kita.

Bersama dengan teman kelompokmu, temukan manfaat-manfaat zat radioaktif yang dapat dihasilkan dari reaktor nuklir pada bidang pertanian maupun kesehatan. Temukan pula efek-efek negatif yang ditimbulkan oleh reaktor nuklir tersebut. Setelah menemukan data-data terkait hal tersebut, buatlah tulisan ilmiah yang nanti akan

dibaca oleh teman-temanmu di **mading sekolah** terkait dengan pendapatmu mengenai reaktor nuklir tersebut.

### Rangkuman

1. Perkembangan teori atom dimulai dari filosofi demokritus mengenai atom. Kemudian J.J. Thompson menemukan partikel elektron yang merupakan penyusun inti atom. Model inti atom dikembangkan oleh Rutherford yang sampai saat ini masih diyakini oleh para ilmuwan.
2. Inti atom tersusun atas proton, neutron, dan elektron yang memiliki massa, muatan, dan gaya interaksi yang berbeda.
3. Proton dan neutron terletak di dalam inti atom, sedangkan elektron mengorbit mengelilingi inti atom dengan tingkat energi tertentu. Proton dan neutron berikatan sangat kuat di dalam inti dan memiliki energi ikat yang besar.
4. Energi ikat merupakan energi yang diperlukan untuk melepaskan ikatan proton dan neutron. Besarnya energi ikat tergantung pada defek massa.
5. Unsur yang memiliki energi ikat per nukleon yang kuat akan memiliki kestabilan, sedangkan unsur yang memiliki energi ikat per nukleon yang kecil akan cenderung tidak stabil sehingga berusaha meluruhkan inti nya agar stabil. Unsur yang tidak stabil ini disebut sebagai unsur radioaktif, dan akan meluruhkan partikel radiasi.
6. Partikel radiasi terdiri dari partikel alfa, beta, dan gamma. Partikel tersebut memiliki karakteristik masing-masing baik itu massa, muatan, kecepatan, serta daya tembus.
7. Reaksi fisi dan fusi merupakan reaksi yang terjadi dalam inti atom. Reaksi fisi dan fusi menggambarkan pembentukan inti baru (unsur baru) dari hasil peluruhan baik secara alami maupun buatan.

## Asesmen

1. Seorang teman menyarankan bahwa inti terdiri dari jumlah proton dan elektron yang sama, dan bukan neutron. Bukti apa yang dapat kalian kutip untuk menunjukkan bahwa teman Anda salah?
2. Ketika radioaktif fosfor (P) meluruh, fosfor tersebut memancarkan positron. Akankah inti yang dihasilkan menjadi isotop fosfor lainnya? Jika tidak, apa yang akan terjadi?
3. Mengapa penanggalan Carbon tidak efektif untuk mengukur usia tulang dinosaurus?
4. Ketika makanan disinari dengan sinar gamma dari sumber Kobalt-60, apakah makanan tersebut menjadi radioaktif? Berikan argumentasi yang tepat untuk jawaban kalian.
5. Temukan energi disintegrasi Q untuk peristiwa fisi Uranium dengan mempertimbangkan peluruhan fragmen fisi. Beberapa massa atom dan partikel yang dibutuhkan adalah:

$^{235}\text{U}$	235.0439 u	$^{140}\text{Ce}$	139.9054 u
n	1.008 66 u	$^{94}\text{Zr}$	93.9063 u

Petunjuk: tentukan persamaan reaksi fisi terlebih dahulu.

## Partikel Elementer

Model atom standar mengklasifikasi partikel elementer (dasar) menjadi dua kelompok yaitu Boson dan Fermion. Boson merupakan kelompok untuk partikel yang menghasilkan gaya dan memiliki spin 0 dan 1, sedangkan Fermion merupakan kelompok partikel yang menciptakan materi dan memiliki spin  $\frac{1}{2}$ . Para ilmuwan meyakini bahwa proton dan neutron yang berikatan sangat kuat dalam inti tersusun dari partikel-partikel quarks/antiquark yang disebut sebagai hardon. Sedangkan elektron yang diyakini berada mengelilingi inti dan tersusun oleh partikel-partikel yang disebut dengan lepton. Quark dan lepton tersebut memiliki karakteristik yang berbeda berdasarkan pada gaya interaksi, massa, serta muatan dari partikel tersebut. Sehingga partikel-partikel quark dan lepton tersebut ada yang termasuk ke dalam golongan fermion.

## Reaktor Fisi

Energi yang tersedia dari fisi nuklir diperkenalkan ke dunia dalam bentuk bom nuklir. Citra kekerasan ini masih mempengaruhi pemikiran kita tentang tenaga nuklir. Selain itu, bencana Chernobyl 1986 yang menakutkan di Uni Soviet dan kita menemukan banyak orang melihat tenaga nuklir sebagai teknologi jahat. Energi nuklir padahal dapat dimanfaatkan untuk berbagai macam kepentingan secara positif, seperti di Amerika Serikat sekitar 20% energi listrik dihasilkan oleh reaktor fisi nuklir.

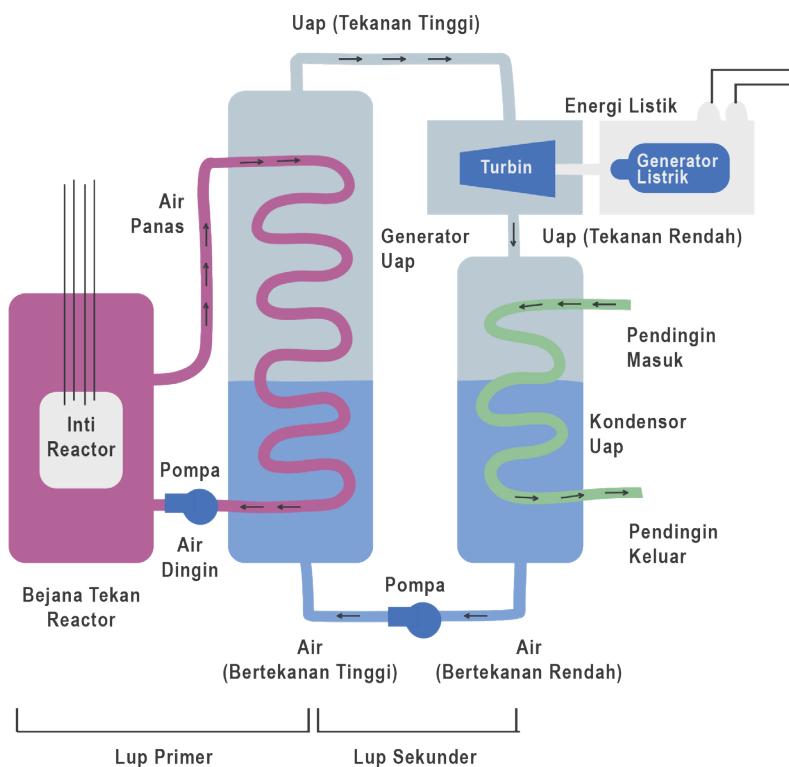
Reaktor ini merupakan tungku nuklir yang berbahan bakar fosil. Proses kerja reaktor sangat sederhana, yaitu merebus air untuk menghasilkan uap untuk turbin. Perbedaan praktis terbesar adalah jumlah bahan bakar yang terlibat. Satu kilogram bahan bakar Uranium yang lebih kecil dari bola bisbol, menghasilkan lebih banyak energi daripada 30 muatan mobil pengangkut batu bara.

Salah satu kelemahan daya fisi adalah dihasilkannya produk limbah radioaktif. Inti atom ringan paling stabil ketika terdiri dari jumlah proton dan neutron yang sama dan terutama inti berat yang membutuhkan lebih banyak neutron daripada proton untuk stabilitas. Misalnya, ada 143 neutron tetapi hanya 92 proton di U-235. Ketika fisi Uranium menjadi dua elemen berbobot sedang, neutron

ekstra dalam inti membuat mereka tidak stabil. Fragmen ini yang membuat radioaktif kebanyakan memiliki waktu paruh yang sangat pendek. Sebagian dari mereka tetap ada yang memiliki waktu paruh yang sangat lama sampai ribuan tahun.

Pembuangan produk-produk limbah radioaktif secara aman dan bahan-bahan radioaktif dalam produksi bahan bakar nuklir memerlukan tata dan prosedur penyimpanan khusus. Tenaga fisi memang sudah ada sejak setengah abad yang lalu, tapi teknologi pembuangan limbah radioaktif masih dalam tahap perkembangan.

Gambar 9.9 menunjukkan bagian dasar dari sebuah reaktor nuklir jenis Pressurized Water Reactor (PWR).



Gambar 9.9 Skema Reaktor Nuklir PWR  
Sumber : Nanda Auliarahma/Kemendikburistek (2022)

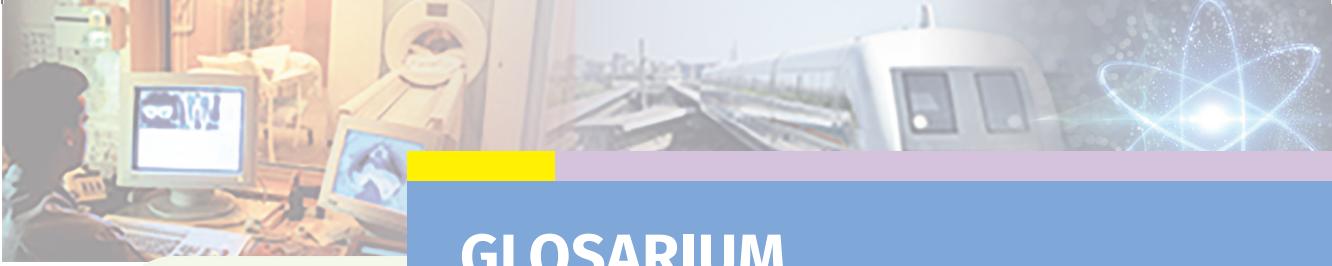
Gambar 9.9 menunjukkan garis besar pembangkit listrik berdasarkan reaktor air bertekanan (PWR), jenis yang umum digunakan di Amerika Utara. Air dalam reaktor seperti itu, digunakan baik sebagai moderator maupun sebagai media perpindahan panas. Pada putaran primer, air disirkulasikan melalui bejana reaktor dan mentransfer energi pada suhu dan tekanan tinggi (mungkin 600 K dan 150 atm) dari teras reaktor panas ke pembangkit uap, yang merupakan bagian dari putaran sekunder. Penguapan dalam pembangkit uap memberikan uap bertekanan tinggi untuk mengoperasikan turbin yang menggerakkan generator listrik. Uap bertekanan rendah dari turbin didinginkan dan dikondensasikan menjadi air untuk menyelesaikan putaran sekunder.

#### Refleksi

Setelah membaca dan mempelajari Bab 9 Fisika Inti dan Radioaktivitas, coba nilai seberapa dalam pemahamanmu. Berikan ceklist (✓) sesuai dengan pendapatmu!

Pernyataan	Tingkat Pemahaman			
	Kurang	Cukup	Baik	Baik Sekali
Sejarah perkembangan teori atom.				
Struktur dan karakteristik inti atom.				
Pengaruh energi ikat inti terhadap kestabilan inti.				
Peluruhan zat radioaktif melalui pancaran partikel radiasi (alfa, beta dan gamma).				

Pernyataan	Tingkat Pemahaman			
	Kurang	Cukup	Baik	Baik Sekali
Reaksi fisi dan fusi yang terjadi di dalam inti.				



## GLOSARIUM

<b>akar-rata-rata-kuadrat (rms)</b>	Akar kuadrat dari jumlah kuadrat nilai rata-rata arus atau tegangan bolak-balik.
<b>aktivitas sumber radioaktif</b>	Jumlah peluruhan inti atom yang terjadi per satuan waktu dalam sumber tersebut.
<b>ampere</b>	Satuan pokok untuk arus dalam SI.
<b>amperemeter</b>	Alat untuk mengukur arus listrik.
<b>arus bolak-balik</b>	Arus atau tegangan yang arahnya membalik secara teratur dan persamaannya sinusoidal.
<b>arus konvensional</b>	Gagasan bahwa arus listrik merupakan aliran muatan positif dari kutub positif ke kutub negatif dan pada kenyataannya arus listrik dalam logam berlawanan arah.
<b>arus listrik</b>	Aliran pembawa muatan tiap satuan waktu.
<b>arus searah</b>	Arus tetap dalam satu arah, seperti arus yang dihasilkan pada rangkaian baterai.
<b>coulomb</b>	satuan muatan listrik
<b>dielektrik</b>	Bahan isolator yang ditempatkan di antara pelat kapasitor untuk meningkatkan kapasitansinya.
<b>elektron</b>	Partikel yang bermuatan negatif.



<b>energi ikat</b>	Energi yang dibutuhkan untuk memisahkan hingga tak terhingga semua nukleon inti.
<b>energi potensial listrik</b>	Energi karena posisi muatan dalam medan listrik.
<b>foton</b>	Cahaya sebagai paket energi.
<b>farad (F)</b>	Satuan kapasitansi.
<b>fisi nuklir</b>	Pembelahan inti berat menjadi dua inti yang lebih ringan dengan massa yang kira-kira sama.
<b>fluks magnet</b>	Hasil kali kuat medan magnet dan luas bidang yang tegak lurus terhadap garis-garis fluks: $F = BA$ .
<b>fotoelektron</b>	Elektron yang dipancarkan oleh emisi fotolistrik.
<b>foton</b>	Kuanta energi ketika energi itu dalam bentuk radiasi elektromagnetik.
<b>frekuensi ambang</b>	Frekuensi minimum peristiwa radiasi yang diperlukan untuk menyebabkan emisi fotoelektron dari permukaan logam tertentu.
<b>frekuensi</b>	Jumlah osilasi (siklus) gelombang per satuan waktu.
<b>frekuensi resonansi</b>	Frekuensi ketika resonansi terjadi.
<b>fusi nuklir</b>	Persitiwa dua inti ringan bergabung untuk membentuk inti dengan massa yang lebih besar.



<b>galaksi</b>	Sekelompok ratusan juta bintang, sisa-sisa bintang, gas, dan materi gelap yang disatukan oleh gravitasi.
<b>garis medan magnet</b>	Garis khayal di sekitar magnet yang kerapatannya menunjukkan kuat medan magnet dan arahnya.
<b>gaya elektromagnetik</b>	Gaya pada penghantar berarus yang membentuk sudut terhadap medan magnet.
<b>gaya gerak listrik (ggl)</b>	Energi yang ditransfer per satuan muatan yang melewati catu daya, diukur dalam volt.
<b>gaya inti</b>	Gaya yang menahan nukleon-nukleon dalam inti bersama-sama.
<b>gaya Lorentz</b>	Gaya yang terjadi pada muatan bergerak dalam medan magnet.
<b>gelombang elektromagnetik</b>	Gelombang yang terdiri dari medan listrik dan medan magnet yang berosilasi tegak lurus satu sama lain dan searah dengan arah rambat gelombang.
<b>gerbang logika</b>	Penyusun elektronika digital yang setiap cara kerja rangkaian pada <b>gerbang logika</b> menggunakan prinsip aljabar Boolean.
<b>hambatan</b>	Perbandingan beda potensial $V$ melintasi penghantar dengan arus $I$ di dalamnya.
<b>hambatan dalam</b>	Hambatan antara kutub catu daya.
<b>hambatan jenis</b>	Sifat bahan tertentu yang menunjukkan seberapa kuat bahan tersebut menahan aliran arus listrik yang merupakan konstanta untuk setiap logam.



<b>hukum Coulomb</b>	Hukum tentang gaya antara dua muatan titik yang sebanding dengan hasil kali muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara keduanya.
<b>Hukum Lenz</b>	Hukum yang menyatakan bahwa arah GGL induksi sedemikian rupa sehingga menimbulkan efek untuk melawan perubahan yang menghasilkannya.
<b>hukum Ohm</b>	Hukum yang menyatakan bahwa untuk konduktor logam pada suhu konstan, arus dalam konduktor sebanding dengan beda potensial yang melintasinya.
<b>hukum I Kirchoff</b>	Hukum yang menyatakan jumlah arus listrik pada percabangan.
<b>hukum II Kirchoff</b>	Hukum yang menyatakan jumlah tegangan pada rangkaian listrik tertutup.
<b>impedansi</b>	Analogi hambatan total pada rangkaian arus bolak balik.
<b>induktansi diri</b>	Karakteristik kumparan saat mendapatkan perubahan fluks magnetik sehingga menghasilkan GGL induksi.
<b>Inti atom</b>	Inti kecil bermuatan positif di pusat atom yang mengandung sebagian besar massanya dengan elektron negatif mengelilinginya.
<b>inti reaktor</b>	Tempat bahan bakar (Uranium), moderator, dan batang kendali yang merupakan pendukung reaksi fisi.
<b>ion</b>	Partikel bermuatan yang terbentuk ketika sebuah atom memperoleh atau kehilangan satu atau lebih elektron sehingga tidak mengandung jumlah proton dan elektron yang sama.



<b>ion positif</b>	Partikel bermuatan positif terbentuk ketika sebuah atom kehilangan satu atau lebih elektron.
<b>isotop</b>	Bentuk berbeda dari unsur yang sama yang memiliki jumlah proton yang sama tetapi jumlah neutron yang berbeda dalam intinya.
<b>kapasitansi</b>	Perbandingan muatan Q terhadap potensial V untuk sebuah kapasitor.
<b>kapasitor</b>	Komponen rangkaian yang menyimpan muatan dan, oleh karena itu, memiliki kapasitansi.
<b>konstanta peluruhan <math>\lambda</math></b>	Konstanta untuk peluruhan radioaktif, merupakan peluang peluruhan inti per satuan waktu.
<b>kuat medan listrik</b>	Gaya per satuan muatan yang bekerja pada muatan positif stasioner kecil yang ditempatkan pada titik tertentu.
<b><i>light-dependent resistor (LDR)</i></b>	Sebuah jenis resistor yang resistansinya berkurang karena peningkatan intensitas cahaya di atasnya (fotoresistor).
<b>medan listrik</b>	Ruang di sekitar muatan ketika muatan listrik mengalami gaya.
<b>medan magnet</b>	Wilayah ketika muatan bergerak atau bahan magnetik mengalami gaya (magnet).
<b>nomor atom</b>	Jumlah proton dalam inti atom.
<b>nomor massa</b>	Jumlah total proton ditambah jumlah neutron dalam inti.
<b>nomor nukleon</b>	Istilah lain untuk nomor massa.



<b>nomor proton</b>	Istilah lain untuk nomor atom.
<b>nomor massa</b>	Nomor yang menunjukkan jumlah proton atau jumlah elektron.
<b>nukleon</b>	Nama yang diberikan untuk proton atau neutron dalam nukleus.
<b>nukleus (inti)</b>	Bagian tengah atom yang bermuatan positif, yang mengandung proton dan neutron; hampir semua massa atom terkonsentrasi di sini.
<b>nuklida</b>	Sebuah kelas inti yang memiliki nomor nukleon tertentu dan nomor proton tertentu.
<b>ohm</b>	Satuan hambatan listrik.
<b>ohmmeter</b>	Alat ukur hambatan listrik.
<b>osiloskop sinar katoda (Cathode Ray Oscilloscope /CRO)</b>	Instrumen yang digunakan untuk menampilkan, mengukur, dan menganalisis berbagai bentuk gelombang rangkaian listrik.
<b>panjang gelombang ambang</b>	Panjang gelombang maksimum yang sesuai dengan frekuensi ambang untuk menimbulkan emisi fotolistrik.
<b>panjang gelombang de Broglie</b>	Panjang gelombang yang terkait dengan partikel yang bergerak.
<b>permeabilitas magnetik</b>	Kapasitansi kapasitor keping sejajar dengan dielektrik antara pelat dibagi dengan kapasitansi kapasitor ruang hampa di antara pelat.



<b>permittivitas relatif</b>	Kapasitansi kapasitor keping sejajar dengan dielektrik antara pelat dibagi dengan kapasitansi kapasitor ruang hampa di antara pelat.
<b>permittivitas ruang hampa</b>	Konstanta yang digunakan dalam menghitung gaya antara partikel bermuatan dalam ruang hampa; simbolnya $\epsilon_0$ dan nilainya $8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$
<b>potensial listrik</b>	Usaha yang dilakukan per satuan muatan positif dalam membawa muatan uji kecil dari tak terhingga ke titik tersebut.
<b>proton</b>	Salah satu dari tiga jenis partikel yang menyusun atom dari semua unsur; mereka memiliki muatan positif, massa sekitar 1 u, dan ditemukan dalam inti.
<b>quanta</b>	Paket diskrit atau jumlah energi radiasi elektromagnetik.
<b>radioaktif</b>	Inti yang tidak stabil dan karenanya memancarkan partikel dan/atau radiasi elektromagnetik untuk meningkatkan stabilitasnya.
<b>rangkaian paralel</b>	Rangkaian arus yang terdiri dari lebih dari satu jalur alternatif untuk membentuk <i>loop</i> .
<b>rangkaian seri</b>	Rangkaian dengan komponen-komponennya dihubungkan satu demi satu, membentuk satu <i>loop</i> lengkap.



<b>reaktansi induktif</b>	Analogi hambatan pada induktansi saat dihubungkan dengan arus bolak balik.
<b>reaktansi kapasitif</b>	Analogi hambatan pada kapasitor saat dihubungkan dengan arus bolak balik.
<b>reaktor nulir</b>	Tempat mereaksikan zat radioaktif sehingga menghasilkan unsur baru melalui reaksi fisi atau fusi.
<b>resistor</b>	Perangkat yang memiliki hambatan terhadap aliran arus listrik.
<b>resonansi rangkaian AC</b>	Ketika reaktansi induktif sama dengan reaktansi kapasitif.
<b>rheostat</b>	Jenis resistor yang dapat menghasilkan tegangan variabel terus menerus.
<b>sakelar</b>	Perangkat untuk menyambungkan atau memutuskan arus listrik.
<b>satuan massa atom (u atau sma)</b>	Satu satuan massa atom ( $1\text{ u}$ ) sama dengan $1,66 \times 10^{-27}\text{ kg}$ .
<b>semikonduktor</b>	Sebuah bahan dengan konduktivitas listrik yang berada di antara isolator listrik dan konduktor listrik.
<b>solenoid</b>	Kumparan kawat yang digunakan sebagai elektromagnet.
<b>spektrometer</b>	Instrumen yang digunakan untuk menyelidiki spektrum dan mengukur panjang gelombangnya.
<b>spektroskopi</b>	Ilmu yang mempelajari spektrum.



<b>spektrum elektromagnetik</b>	Rentang frekuensi (atau panjang gelombang) radiasi elektromagnetik yang kontinu.
<b>tegangan puncak ke puncak</b>	Dua kali nilai maksimum (amplitudo) dari arus atau tegangan dari sumber arus bolak-balik.
<b>tesla (T)</b>	Satuan kerapatan fluks magnet.
<b>teori kuantum</b>	Teori mengenai radiasi elektromagnetik dianggap terdiri dari paket energi yang disebut foton.
<b>terkuantisasi</b>	Hanya ada dalam jumlah diskrit, bukan kontinu.
<b>tingkat energi diskrit</b>	Tingkat energi spesifik tertentu yang dapat dimiliki elektron dalam atom; elektron tidak dapat memiliki energi di antara tingkat ini.
<b>tingkat energi elektron</b>	Tingkat energi spesifik tertentu yang dapat dimiliki elektron dalam atom; elektron tidak dapat memiliki energi di antara tingkat ini.
<b>transformator</b>	Perangkat listrik yang terdiri dari dua atau lebih kumparan.
<b>volt</b>	Satuan yang digunakan untuk mengukur beda potensial.



<b>waktu paruh <math>t_{1/2}</math></b>	Waktu yang diperlukan untuk jumlah inti yang tidak meluruh dalam sampel isotop radioaktif untuk direduksi menjadi setengah dari jumlah aslinya.
<b>watt</b>	Satuan daya (simbol W), sama dengan laju usaha 1 joule per detik.
<b>weber (Wb)</b>	Satuan fluks magnet; satu weber sama dengan satu tesla meter-kuadrat, yaitu $Tm^2$ .



## DAFTAR PUSTAKA

- Crundell, Mike and Goodwin, Geoff (2014). *Physics Third Edition. Cambridge International AS & A Level*. London: Hodder Education.
- Cutnell D. Jhon and Jhonson W. Kenneth (2012). *Physics 9th edition*. United State of America: Jhon Wiley & Son. Inc
- Duncan, Tom and Kennett, Heather (2014). *Physics 3rd edition. Cambrdige IGCSE*. London: Hodder Education.
- Giancoli, Douglas C. (2009). *Physics for Scientist and Engineers with Modern Physics*. United State of America: Pearson Education. Inc.
- Halliday and Resnick, R (2001). *Fundamental of Physics. 6th edition*. New York: Jhon Wiley & Son.
- Hewitt G. Paul (2015). *Conceptual Physics Twelfth Edition*. United State of America: Pearson Education. Inc.
- Lofts, Graeme, dkk (2004). *Jacandra Physics 1 2nd Edition*. Australia: Jhon Wiley & Sons Australia, Ltd.
- Tipler, Paul A, dkk (2010). *Fisika : Untuk Sains dan Teknik Jilid 1 (Alih Bahasa: Lea Prasetyo dan Rahmad W. Adi)*. Jakarta: Erlangga

# DAFTAR SUMBER GAMBAR

- A Loose Nacktie (2019). Diunduh dari: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Greenhouse-effect-t2.svg>. Pada 2 Oktober 2022
- Amfeli (2020). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circuito\\_integrado.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circuito_integrado.jpg). Pada 22 Oktober 2022
- Bearfotos (2022). Lisensi Bebas. Diunduh dari: <a href="https://www.freepik.com/free-photo/high-speed-train-motion\_1238472.htm#query=high%20speed%20train&position=23&from\_view=keyword">Image by bearfotos</a> on Freepik. Pada 21 Desember 2022
- Canva Edu (2022). Lisensi Pendidikan. Diunduh dari : [https://www.canva.com/design/DAFMKUo-IUw/dq0Nb9Dqgl2ZXdhL\\_rEyg/view?utm\\_content=DAFMKUo-IUw&utm\\_campaign=designshare&utm\\_medium=link2&utm\\_source=sharebutton](https://www.canva.com/design/DAFMKUo-IUw/dq0Nb9Dqgl2ZXdhL_rEyg/view?utm_content=DAFMKUo-IUw&utm_campaign=designshare&utm_medium=link2&utm_source=sharebutton). Pada 22 Agustus 2022
- Canva Edu (2022). Lisensi Pendidikan. Diunduh dari : [https://www.canva.com/design/DAFP78UTcnk/-GihQsL1bUy15vkn2o2zDg/view?utm\\_content=DAFP78UTcnk&utm\\_campaign=designshare&utm\\_medium=link2&utm\\_source=sharebutton](https://www.canva.com/design/DAFP78UTcnk/-GihQsL1bUy15vkn2o2zDg/view?utm_content=DAFP78UTcnk&utm_campaign=designshare&utm_medium=link2&utm_source=sharebutton). Pada 22 Agustus 2022
- Canva Edu (2022). Lisensi Pendidikan. Diunduh dari : [https://www.canva.com/design/DAFLK6u83R8/5pgDEXJpncNQlaKxnH3ttg/view?utm\\_content=DAFLK6u83R8&utm\\_campaign=designshare&utm\\_medium=link2&utm\\_source=sharebutton](https://www.canva.com/design/DAFLK6u83R8/5pgDEXJpncNQlaKxnH3ttg/view?utm_content=DAFLK6u83R8&utm_campaign=designshare&utm_medium=link2&utm_source=sharebutton). Pada 22 Oktober 2022
- Chetvorno (2021). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetic\\_field\\_near\\_poles\\_2.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetic_field_near_poles_2.svg). Pada 23 Agustus 2022
- Cool Cat (2008). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maglev\\_Propulsion.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Maglev_Propulsion.svg). Pada 30 Agustus 2022
- Cool Cosmos (2022). Ipac Caltech. Diunduh dari [https://coolcosmos.ipac.caltech.edu/page/lesson\\_herschel\\_experiment](https://coolcosmos.ipac.caltech.edu/page/lesson_herschel_experiment). Pada 2 Oktober 2022
- Eric Schrader (2011). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Capacitors\\_\(7189597135\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Capacitors_(7189597135).jpg). Pada 17 Agustus 2022
- Freepik (2022). Lisensi Bebas. Diunduh dari: [https://www.freepik.com/free-vector/person-hazmat-suit-checking-temperature-park\\_8720169.htm#page=4&query=temperature%20check&position=45&from\\_view=keyword](https://www.freepik.com/free-vector/person-hazmat-suit-checking-temperature-park_8720169.htm#page=4&query=temperature%20check&position=45&from_view=keyword). Pada 9 Desember 2022
- Gburiola (2005). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thunder.jpg>. Pada 17 Agustus 2022



- Geek (2010). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFPt\\_charges\\_plus\\_minus\\_thumb.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VFPt_charges_plus_minus_thumb.svg). Pada 17 Agustus 2022
- H. Miller (2015). MIT Mathlets. Diunduh dari <https://mathlets.org/mathlets/series-rlc-circuit/>. Pada 30 Agustus 2022
- Hubi (2022). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Erdmagnetfeld.png> Pada 23 Agustus 2022
- Idntimes (2022). Diunduh dari: <https://www.idntimes.com/science/discovery/alfonsus-adi-putra-2/fakta-unik-quantum-physics?page=all>. Pada 21 Desember 2022
- IOK (2008). Wikimedia Commons. Public Domain. Diunduh dari: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electric\\_Bell\\_animation.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electric_Bell_animation.gif). Pada 23 Agustus 2022
- Jane Halpern (2020). Diunduh dari: <https://www.eecs.mit.edu/circuit-board-view-oscilloscopes-keysight-technologies-enable-new-insights-eecs/>. Pada 21 Desember 2022
- Janno028 (2022). Lisensi Bebas. Diunduh dari: <a href="https://www.freepik.com/free-photo/laptop-wooden-table-with-printer\_977942.htm#query=home%20printer&position=32&from\_view=search&track=sph">Image by janno028</a> on Freepik. Pada 21 Desember 2022
- Janno028 (2022). Lisensi Bebas. Diunduh dari: <a href="https://www.freepik.com/free-photo/old-digital-multimeter-isolated-white-background\_1129162.htm">Image by janno028</a> on Freepik. Pada 21 Desember 2022
- Jfmelero (2008). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Regla\\_mano\\_derecha\\_Lorentz.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Regla_mano_derecha_Lorentz.svg). Pada 2 Oktober 2022
- Jung Yeon Je (2009). NBS News. Diunduh dari: <https://www.nbcnews.com/id/wbna30523865>. Pada 2 Oktober 2022
- Katie. (2022). Save my Exam. Diunduh dari: <https://www.savemyexams.co.uk/a-level/physics/cie/22/revision-notes/25-astronomy--cosmology/25-1-astronomy/25-1-3-wiens-displacement-law/>. Pada 2 Oktober 2022
- Kjpargeter (2022). Lisensi Bebas. Diunduh dari: <a href="https://www.freepik.com/free-photo/3d-render-abstract-with-motion-sound-wave-design\_12003785.htm">Image by kjpargeter</a> on Freepik. Pada 21 Desember 2022
- Li, Jia & Rossignol, Fabrice & Macdonald, Joanne. (2015). Inkjet printing for biosensor fabrication: Combining chemistry and technology for advanced manufacturing. *Lab on a Chip*. 15. 10.1039/C5LC00235D.



- Library of Congress's Prints and Photographs division (2022). Wikimedia Commons. Public Domain. Diunduh dari: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert\\_Einstein\\_Head.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albert_Einstein_Head.jpg). Pada 21 Desember 2022
- M. Miderhoud (2005). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Car\\_fuses.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Car_fuses.jpg). Pada 7 Desember 2022
- Mansi Katarey (2020). How Do Thermometer Work. Being Well. Diunduh dari <https://medium.com/beingwell/how-do-thermometer-guns-work-6b9d557dcd95>. Pada 2 Oktober 2022
- Medium.com (2022). Diunduh dari: <https://medium.com/@LEAPandinnovate/fusion-energy-chasing-star-power-170ee9fb6bed>. Pada 21 Desember 2022
- MikeRun (2020). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Long-wire-right-hand-rule.svg>. Pada 2 Oktober 2022
- MikeRun (2007). Wikimedia Commons. Lisensi Publik. Diunduh dari: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/61/Binding\\_energy\\_curve\\_-\\_common\\_isotopes-with-nuclei-DE.svg/640px-Binding\\_energy\\_curve\\_-\\_common\\_isotopes-with-nuclei-DE.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/61/Binding_energy_curve_-_common_isotopes-with-nuclei-DE.svg/640px-Binding_energy_curve_-_common_isotopes-with-nuclei-DE.svg.png) Pada 28 Desember 2002
- Mj Bird (2018). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sharp\\_Solar\\_cell\\_panels.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sharp_Solar_cell_panels.png). Pada 2 Oktober 2022
- Mj Bird (2018). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari: <https://www.nafiun.com/2013/09/pita-kestabilan-inti-atom-nuklida.html>. Pada 2 Oktober 2022
- Morn (2012). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prisms\\_with\\_high\\_and\\_low dispersion.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prisms_with_high_and_low dispersion.png). Pada 2 Oktober 2022
- NASA (1990). Wikimedia Commons. Public Domain. Diunduh dari: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:STS-31\\_Hubble\\_Space\\_Telescope\\_\(HST\)\\_\(SAs\\_%26\\_HGAs\\_deployed\)\\_is\\_grappled\\_by\\_RMS.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:STS-31_Hubble_Space_Telescope_(HST)_(SAs_%26_HGAs_deployed)_is_grappled_by_RMS.jpg). Pada 2 Oktober 2022
- Nevit Dilmen (2011). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Medical\\_X-Ray\\_imaging\\_DYM03\\_nevit.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Medical_X-Ray_imaging_DYM03_nevit.jpg). Pada 2 Oktober 2022
- News18 (2022). Diunduh dari: <https://www.news18.com/news/tech/even-after-100-years-einsteins-general-theory-of-relativity-stands-the-test-of-time-1154514.html>. Pada 21 Desember 2022



- NIAID (2020). National Institute of Allergy and Infectious Diseases. Diunduh dari [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SARS-CoV-2\\_scanning\\_electron\\_microscope\\_image.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SARS-CoV-2_scanning_electron_microscope_image.jpg). Pada 2 Oktober 2022
- Omegatron (2005). Wikimedia Commons. Public Domain. Diunduh dari : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transistor\\_symbols.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transistor_symbols.png) Pada 9 Desember 2022
- OpenStax (2011). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Openstax\\_college-physics\\_22.40\\_solenoid-Bfield.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Openstax_college-physics_22.40_solenoid-Bfield.jpg). Pada 23 Agustus 2022
- Raimond Spekking (2019). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Samsung\\_DCB-S305G\\_-\\_board\\_-\\_Maxim\\_Integrated\\_MAX202-93597.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Samsung_DCB-S305G_-_board_-_Maxim_Integrated_MAX202-93597.jpg) Pada 9 Desember 2022
- SparkFun Elektronik (2013). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arduino\\_Uino\\_-\\_R3.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arduino_Uino_-_R3.jpg). Pada 9 Desember 2022
- Teksomolika (2022). Lisensi Bebas. Diunduh dari: <a href="https://www.freepik.com/free-photo/electronic-circuit-board-with-processor-wires\_6060176.htm#query=micro%20chip&position=14&from\_view=keyword">Image by teksomolika</a> on Freepik. Pada 9 Desember 2022
- Tim Skemaku (2022). Skemaku. Diunduh dari: <https://skemaku.com/wp-content/uploads/2018/11/bentuk-transistor.jpg> Pada 22 Oktober 2022
- UF Physics (2022). University of Florida. Diunduh dari: [https://www.phys.ufl.edu/courses/phy2054/s09/lectures/2054\\_ch21A.pdf](https://www.phys.ufl.edu/courses/phy2054/s09/lectures/2054_ch21A.pdf) Pada 30 Agustus 2022
- Wavebreakmedia\_mikro (2022). Lisensi Bebas. Diunduh dari: [https://www.freepik.com/free-photo/airport-security-officer-using-metal-detector-check-bag\\_9598408.htm#query=detector%20at%20aiport&position=0&from\\_view=search&track=ais](https://www.freepik.com/free-photo/airport-security-officer-using-metal-detector-check-bag_9598408.htm#query=detector%20at%20aiport&position=0&from_view=search&track=ais). Pada 9 Desember 2022
- Zmaragdus (2019). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Silicon\\_matrix\\_p-doped.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Silicon_matrix_p-doped.png) pada 22 Oktober 2022
- Zureks (2008). Wikimedia Commons. Creative Commons. Diunduh dari: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solenoid-1.png>. Pada 23 Agustus 2022

# INDEX

## A

Akar rata-rata kuadrat (rms)  
Aktivitas sumber radioaktif  
Ampere  
Amperemeter  
Arus bolak-balik  
Arus konvensional  
Arus listrik  
Arus searah  
Atom

## B

Coulomb

Daya listrik  
Defek massa  
Dielektrik

## E

Elektron  
Energi ikat  
Energi potensial listrik

## F

Farad  
Fisi nuklir  
Fluks magnet  
Fotoelektron  
Foton

Frekuensi ambang

Frekuensi

Frekuensi resonansi

Fusi nuklir

## G

Galaksi  
Garis medan magnet  
Gaya elektromagnetik  
Gaya gerak listrik (GGL)  
Gaya inti  
Gaya Lorentz  
Gelombang Elektromagnetik

## H

Hambatan  
Hambatan dalam  
hambatan jenis  
Hukum Coulomb  
Hukum Faraday  
Hukum Lenz  
Hukum Ohm  
Hukum I Kirchoff  
Hukum II Kirchoff

## I

Impedansi  
Induktansi diri  
Inti atom  
Ion  
Ion positif  
Isotop

**K**

Kapasitansi  
Kapasitor  
Konstanta peluruhan  
Kuat medan listrik

Panjang gelombang de Broglie  
Pembelajaran berdiferensiasi  
Permeabilitas magnet  
Permitivitas relatif  
Permitivitas ruang hampa  
Potensial listrik

**L**

Light-Dependent Resistor (LDR)  
Listrik statis

**Q**  
Quanta

**M**

Muatan listrik  
Magnet  
Medan listrik  
Medan magnet  
Nomor atom  
Nomor massa  
Nomor nukleon

R  
Radiasi  
Radioaktif  
Rangkaian paralel  
Rangkaian seri  
Reaktansi induktif  
Reaktansi kapasitif  
Resistor

**N**

Nomor massa  
Nomor proton  
Nukleon  
Nukleus (inti)  
Nuklida

Resonansi rangkaian AC  
Rheostat

**S**

Sakelar  
Satuan massa atom (u) / (sma)  
Solenoid  
Spektrometer  
Spektroskopi  
Spektrum elektromagnetik  
Sinar x  
Solenoida

**O**

Ohm  
Osiloskop Sinar Katoda (Cathode Ray Oscilloscope /CRO)

**P**

Panjang gelombang ambang



## T

Tegangan puncak ke puncak

Tesla (T)

Teori kuantum

Terkuantisasi

Tingkat energi diskrit

Tingkat energi elektron

Transformator

Tegangan listrik

Transmisi

Transformator

Transformasi Galileo

Transformasi Lorentz

## V

Volt

Voltmeter

## W

Waktu paruh  $t^{1/2}$

Watt

Weber



# BIODATA PENULIS

Nama lengkap : Irma Rahma Suwarma, S.Si, M.Pd., Ph.D

Email : irma.rs@upi.edu

Instansi : Universitas Pendidikan Indonesia

Alamat Instansi : Jl. Dr. Setiabudi No 229 Bandung

Bidang Keahlian : Pendidikan IPA, Fisika, STEM

## Riwayat Pekerjaan (10 Tahun Terakhir):

1. Dosen di Departemen Pendidikan Fisika Universitas Pendidikan Indonesia (2008 sampai sekarang)
2. Ketua Pusat Unggulan STEM-ED CTR Universitas Pendidikan Indonesia (2018 sampai sekarang)

## Riwayat Pendidikan Tinggi dan Tahun Belajar:

1. Sarjana Sains Fisika, Universitas Padjadjaran (1999-2003)
2. Magister Pendidikan IPA, Universitas Pendidikan Indonesia (2004-2006)
3. Doctor of Philosophy in Science Education, Shizuoka University (2012-2015)

## Judul Buku dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):

1. Modul Ajar Fisika Inti (2018)
2. Unit Pembelajaran STEM: *Clean Your Artery* (2019)
3. Buku Ajar STEM: Mengenal Pembelajaran STEM untuk Sekolah Dasar dan Menengah (2021)

## Judul Penelitian dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):

1. *Implementation of STEM Post Pandemic Robo in West Java Indonesia* (IEEE, 2022-2023)
2. *Comparing STEM Literacy in Japan and Indonesia* (UPI, 2019 s.d. sekarang)
3. Pengembangan Penilaian Collaborative Problem Solving (PUSMENJAR, 2019)

Informasi Lain dari Penulis: SINTA ID 5983995, Scholar ID [Ykkgt6gAAAAJ](#), Scopus author: [57193868286](#), orcid id :<https://orcid.org/0000-0003-4229-0061>

# BIODATA PENULIS

Nama lengkap : Lia Laela Sarah, S.Pd., M.T.  
*Email* : lialaesas@smalabupi.sch.id  
Instansi : SMA Laboratorium UPI  
Alamat Instansi : Jl. Dr. Setiabudi No. 229 Bandung  
Bidang Keahlian : Pendidikan Fisika

#### Riwayat Pekerjaan (10 Tahun Terakhir):

1. Guru Fisika (2005 sampai sekarang)
2. Wakil Kepala Sekolah Bidang Kurikulum (2013-2021)

#### Riwayat Pendidikan Tinggi dan Tahun Belajar:

1. Sarjana Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia (2001-2005)
2. Magister Teknik Elektro Opsi Media Digital, Institut Teknologi Bandung (2010- 2012)

#### Judul Buku dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):

1. *Book Section* Unit Pembelajaran Fisika SMA Berbasis Inkuiri: Gerak Lurus dengan Percepatan Tetap (2017)
2. Paket Unit Pembelajaran Listrik Statis dan Listrik Arus Searah (2019)

#### Judul Penelitian dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):

1. *Enhancing Science Teacher Technology Literacy Through STEM Learning Arduino* (2021)
2. Pengembangan e-SEL Berbantuan Web 2.0 pada Konsep Dinamika Gerak Rotasi (2021)
3. Pengembangan *Conceptual Change Text* Berbantuan Teknologi Pada Konsep Listrik Statis (2017)



# BIODATA PENELAAH

Nama lengkap : Dr. Khairul Basar, M.Si.  
*Email* : khbasar@itb.ac.id  
Instansi : Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA),  
Institut Teknologi Bandung  
Alamat Instansi : Jl. Ganesha 10 Bandung 40132  
Bidang Keahlian : Fisika

**Riwayat Pekerjaan (10 Tahun Terakhir):**

1. Staf Pengajar FMIPA ITB Bandung

**Riwayat Pendidikan Tinggi dan Tahun Belajar:**

1. Sarjana Fisika, Institut Teknologi Bandung (1997)
2. Magister Fisika, Institut Teknologi Bandung (2001)
3. Doktor Applied Beam Science, Ibaraki University, Japan (2007)

**Judul Buku dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):**

1. Tangkas Catatan Ringkas Fisika Dasar II (Penerbit ITB, 2021)
2. Dasar-dasar Metode Matematika Untuk Ilmu Fisika (Penerbit ITB, 2019)
3. Pengantar Matematika untuk Fisika (Penerbit ITB, 2015)

# BIODATA PENELAAH

Nama lengkap : Dr. Winny Liliawati, S.Pd., M.Si  
Email : winny@upi.edu  
Instansi : Universitas Pendidikan Indonesia  
Alamat Instansi : Jl. Setiabudhi No 229 Bandung  
Bidang Keahlian : Pendidikan Fisika

## Riwayat Pekerjaan (10 Tahun Terakhir):

1. Dosen Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA UPI (2001 sampai sekarang)
2. Sekretaris Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA UPI (2015 sampai sekarang)

## Riwayat Pendidikan Tinggi dan Tahun Belajar:

1. Sarjana Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung (1996-2001)
2. Magister Astronomi, Institut Teknologi Bandung (2003-2006)
3. Doktor Pendidikan IPA, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung (2009-2013)

## Judul Buku dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):

1. Gerak Benda Langit (2019)
2. Pelindung Bumi (2020)

## Judul Penelitian dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):

1. Pengaruh Pendekatan Diferensiasi dalam Model *Problem Based Learning* terhadap Keterampilan Berpikir Kritis Peserta Didik pada Materi Momentum dan Impuls (PTM 2022)
2. Pengembangan *Smart Teaching Materials Oriented Multiple Intelligences* (STM2I) untuk Meningkatkan Pemahaman Konsep dan Mengurangi Miskonsepsi Mahasiswa Calon Guru pada Materi Bumi Antariksa (Hibah Inovasi Pembelajaran, 2022)

**Informasi Lain dari Penelaah:** <https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=D3ie-CkAAAAJ>



# BIODATA PENYUNTING

Nama lengkap : Kinkin Suartini, M.Pd.  
Email : karyakinkin@gmail.com  
Instansi : UIN Syarif Hidayatullah Jakarta  
Alamat Instansi : Jl. Ir. H. Juanda No.95 Ciputat Tangerang Selatan Banten  
Bidang Keahlian : Pendidikan Fisika

## Riwayat Pekerjaan (10 Tahun Terakhir):

1. Dosen Pendidikan Fisika UIN Syarif Hidayatullah Jakarta (2006 sampai sekarang)
2. Penulis lepas buku pendidikan, biografi, bisnis (2007 sampai sekarang)
3. Asesor di LSP Penulis dan Editor Profesional (2018 sampai sekarang)
4. Chief Editor Penerbit Kinzamedia (2020 sampai sekarang)

## Riwayat Pendidikan Tinggi dan Tahun Belajar:

1. Sarjana Pendidikan Fisika, Universitas Negeri Sebelas Maret, Surakarta (1997-2002)
2. Magister Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung (2003-2006)
3. Kandidat Doktor Penelitian dan Evaluasi Pendidikan, Universitas Negeri Jakarta (masuk Tahun Ajaran 2022/2023)

## Judul Buku dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):

1. Fighting Story: Ikhsan K. Suhartono (Penerbit Kinzamedia, 2021)
2. Menjadi Couplepreneur Tangguh Ala Master Apotek (Penerbit Kinzamedia, 2021)
3. Master Marketing (Penerbit Kinzamedia, 2021)

## Buku yang Pernah Disunting (10 Tahun Terakhir):

1. Listrik Magnet (Penerbit GIP, 2014)
2. Memancing Mikroba dari Sampah (Penerbit Kinzamedia, 2020)
3. Analisis Kandungan Formalin pada Tahu (Penerbit Kinzamedia, 2020)
4. Pemanfaatan Metode Geolistrik Resistivitas (Penerbit Kinzamedia, 2020)
5. Fisika Cambridge Kelas XI (Pusbuk, 2021)



**Judul Penelitian dan Tahun Terbit (10 tahun terakhir):**

1. Deskripsi Kemampuan Mahasiswa Prodi Tadris Fisika dalam Menyelesaikan Soal *High Order-Thinking* Berdasarkan Taksonomi Bloom Revisi (2019)
2. Desain Model *Islamic Physics Learning* Berorientasi Kebiasaan Berpikir Fisikawan Muslim untuk Siswa Madrasah Berbasis Pesantren di Indonesia (2020)

**Buku yang Pernah ditelaah, direviu, dibuat ilustrasi dan/atau dinilai (10 tahun terakhir):**

Buku Teks Fisika Kelas X Kurikulum 2013 (Pusbuk, 2019)