



**KELAS 12**

# **FISIKA**

**Menyibak Rahasia Gerakan dan Energi Alam:  
Buku Pegangan Fisika untuk Siswa Kelas 12**

## Kata Pengantar

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas terbitnya e-book Fisika ini yang merupakan bagian dari upaya menghadirkan pembelajaran yang lebih mudah diakses oleh seluruh pelajar Indonesia. Fisika adalah mata pelajaran yang mempelajari gejala alam dan prinsip-prinsip dasar yang mengatur alam semesta, mulai dari gerak, gaya, energi, hingga fenomena kelistrikan dan optik, yang bermanfaat untuk memahami kehidupan sehari-hari maupun perkembangan teknologi.

E-book ini disusun berdasarkan Capaian Pembelajaran Fisika Fase E (sesuai dengan 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). Konten e-book ini dirancang agar memahami materi Fisika secara komprehensif, mengasah keterampilan berpikir kritis, serta menerapkannya dalam kehidupan sehari-hari. Selain materi utama, e-book ini juga dilengkapi dengan latihan soal, pembahasan, serta tautan ke sumber belajar tambahan seperti video pembelajaran interaktif.

E-book ini merupakan bagian dari platform [Fitri](#), sebuah platform pembelajaran digital yang menyediakan akses gratis ke berbagai materi belajar, termasuk e-book, latihan soal, dan video pembelajaran interaktif untuk seluruh anak Indonesia. Fitri hadir sebagai wujud kontribusi nyata dalam mendukung pemerataan akses pendidikan berkualitas di Indonesia. Dengan semangat gotong royong dan inklusi, Fitri berkomitmen untuk membantu seluruh siswa, di mana pun berada, agar dapat belajar secara mandiri, efektif, dan menyenangkan. Hal ini selaras dengan tujuan besar pendidikan Indonesia, yaitu mewujudkan generasi yang cerdas, berkarakter, dan siap menghadapi tantangan zaman.

Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung tersedianya e-book ini. Semoga kehadiran e-book Fisika ini dapat memberikan manfaat nyata dalam proses belajar peserta didik dan turut berkontribusi dalam meningkatkan literasi bangsa.

Jakarta, September 2025  
Tim Fitri

## Daftar Isi

<b>BAB 1: LISTRIK STATIS.....</b>	<b>6</b>
1. Konsep Listrik Statis dan Muatan Listrik .....	8
2. Hukum Coulomb .....	9
3. Medan Listrik.....	11
4. Energi Potensial dan Potensial Listrik .....	14
5. Kapasitor dan Prinsip Kerjanya.....	17
Rangkuman.....	20
Latihan Soal .....	22
Referensi .....	24
<b>BAB 2: LISTRIK DINAMIS .....</b>	<b>25</b>
1. Arus Listrik dan Perbedaan Potensial .....	27
2. Hukum Ohm.....	29
3. Hukum I Kirchhoff untuk Arus Listrik.....	31
4. Kombinasi Hambatan dalam Rangkaian .....	32
5. Sumber Arus Listrik Tegangan Tetap .....	34
6. Hukum II Kirchhoff untuk Tegangan dalam Rangkaian Tertutup .....	36
7. Energi dan Daya Listrik.....	38
8. Berbagai Alat Ukur Listrik .....	40
Rangkuman.....	43
Latihan Soal .....	45
Referensi .....	47
<b>BAB 3: MEDAN MAGNETIK .....</b>	<b>48</b>
1. Medan Magnetik di Sekitar Arus Listrik .....	50
2. Magnetik (Gaya Lorentz) .....	53
Rangkuman.....	56
Latihan Soal .....	57
Referensi .....	59
<b>BAB 4: PRINSIP INDUKSI ELEKTROMAGNETIK DAN SISTEM ARUS AC .....</b>	<b>60</b>
1. Fluks Magnet.....	62
2. Hukum Faraday dan Hukum Lenz .....	64
3. Induktansi Diri.....	67
4. Pemanfaatan Induksi Elektromagnetik .....	70

5. Konsep Arus dan Tegangan Bolak-Balik .....	73
6. Rangkaian Arus Bolak-Balik .....	76
7. Daya dalam Rangkaian Arus Bolak-Balik .....	80
Rangkuman.....	83
Latihan Soal .....	85
Referensi .....	87
<b>BAB 5: RADIASI GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK: KONSEP, SIFAT, DAN APLIKASINYA..</b>	<b>88</b>
1. Memahami Spektrum Gelombang Elektromagnetik.....	90
2. Asal dan Sumber Radiasi Gelombang Elektromagnetik .....	94
3. Aplikasi dan Pemanfaatan Radiasi Gelombang Elektromagnetik .....	98
4. Risiko dan Dampak Negatif Radiasi Gelombang Elektromagnetik .....	101
Rangkuman.....	105
Latihan Soal .....	106
Referensi .....	108
<b>BAB 6: PEMAHAMAN TEORI RELATIVITAS KHUSUS .....</b>	<b>109</b>
1. Postulat Relativitas .....	111
2. Konsep Relativitas Khusus .....	117
3. Massa, Momentum, dan Energi dalam Relativitas .....	122
Rangkuman.....	127
Latihan Soal .....	129
Referensi .....	131
<b>BAB 7: PRINSIP DAN FENOMENA KUANTUM .....</b>	<b>132</b>
1. Energi Radiasi pada Benda Hitam .....	134
2. Spektrum Pergeseran Wien dan Pendekatan Klasik Rayleigh–Jeans .....	137
3. Dasar Teori Kuantum Planck .....	139
4. Fenomena Efek Fotolistrik.....	143
5. Fenomena Efek Compton.....	147
6. Fenomena dan Sifat Sinar-X .....	150
7. Fenomena Difraksi Elektron .....	152
Rangkuman.....	156
Latihan Soal .....	157
Referensi .....	159
<b>BAB 8: FISIKA NUKLIR DAN RADIOAKTIVITAS.....</b>	<b>160</b>
1. Struktur Penyusun Atom .....	162



2. Struktur Inti Atom .....	165
3. Proses Radioaktivitas.....	169
4. Proses Reaksi pada Inti Atom .....	175
5. Penggunaan Teknologi Nuklir .....	180
Rangkuman.....	184
Latihan Soal .....	185
Referensi .....	187
<b>BAB 9: DUNIA TEKNOLOGI DIGITAL .....</b>	<b>188</b>
1. Evolusi Komputer dalam Era Digital.....	190
2. Sistem Transmisi Data dan Informasi .....	194
3. Sistem Representasi Bilangan dalam Transmisi Data.....	197
4. Gerbang Logika (Logika Digital dalam Elektronika) .....	200
5. Media Penyimpanan Data Digital.....	204
6. Dampak Teknologi Digital terhadap Kehidupan Manusia.....	208
Rangkuman.....	212
Latihan Soal .....	213
Referensi .....	215



# BAB 1: LISTRIK STATIS

## Karakter Pelajar Pancasila

Bergotong Royong, Mandiri, dan Bernalar Kritis

**Kata Kunci:** Muatan listrik, Gaya Coulomb, Medan listrik, Kapasitor, Energi potensial, Hukum Coulomb, Potensial listrik, Dielektrik, Fungsi kapasitor, Bidang ekuipotensial.

**Tujuan Pembelajaran: Menelaah Konsep Dasar Kelistrikan dan Aplikasinya**

**1. Menjelaskan konsep gejala kelistrikan dan menggambarkan gejala kelistrikan dalam kehidupan sehari-hari**

- ▷ Mengidentifikasi berbagai gejala kelistrikan yang terjadi dalam kehidupan sehari-hari.
- ▷ Memberikan contoh aplikasi praktis gejala kelistrikan dalam perangkat elektronik sehari-hari.

**2. Menganalisis interaksi antarmuatan listrik melalui hukum Coulomb dan dampaknya terhadap lingkungan**

- ▷ Menyusun penjelasan tentang hubungan gaya antara muatan yang berbeda berdasarkan hukum Coulomb.
- ▷ Menganalisis dampak interaksi muatan listrik terhadap fenomena lingkungan, seperti listrik statis.

### **3. Mengidentifikasi pengaruh medan listrik terhadap muatan listrik**

- ▷ Menyimpulkan pengaruh medan listrik terhadap distribusi muatan dalam suatu sistem.
- ▷ Mempelajari bagaimana medan listrik mempengaruhi pergerakan muatan dalam konduktor.

### **4. Menganalisis hubungan antara gaya Coulomb dan pengaruh medan listrik terhadap muatan listrik**

- ▷ Mengkaji pengaruh gaya Coulomb pada muatan yang berada dalam medan listrik.
- ▷ Mengembangkan pemahaman mengenai hubungan matematis antara gaya Coulomb dan medan listrik.

### **5. Menganalisis hubungan potensial listrik dan energi potensial listrik terhadap muatan listrik**

- ▷ Menjelaskan konsep energi potensial listrik dalam konteks muatan yang dipengaruhi oleh medan listrik.
- ▷ Menghubungkan antara nilai potensial listrik dengan energi yang tersimpan dalam sistem listrik.

### **6. Mengidentifikasi konsep bidang ekuipotensial pada sebuah muatan listrik yang ditempatkan dalam ruang**

- ▷ Mengidentifikasi konsep dan pengertian bidang ekuipotensial dalam teori medan listrik.
- ▷ Menganalisis bagaimana posisi muatan dalam ruang mempengaruhi distribusi potensial listrik.

### **7. Mendeskripsikan fungsi kapasitor dan mengidentifikasi pengaruh penggunaan bahan dielektrik terhadap kapasitas kapasitor**

- ▷ Memahami fungsi kapasitor dalam rangkaian listrik dan bagaimana ia menyimpan energi.
- ▷ Mengkaji dampak penggunaan bahan dielektrik dalam kapasitor terhadap kapasitas penyimpanan energi.

### **8. Memformulasikan prinsip kerja kapasitor dan mengaplikasikannya dalam kehidupan sehari-hari**

- ▷ Menyusun rumus kerja kapasitor dan memahami cara kerjanya dalam rangkaian.
- ▷ Menerapkan penggunaan kapasitor dalam aplikasi praktis, seperti dalam perangkat elektronik.

**F I T R I**



## 1. Konsep Listrik Statis dan Muatan Listrik



*Eksperimen listrik statis dengan menggosokkan sisir ke wol atau rambut yang menyebabkan potongan kertas kecil menempel pada sisir tersebut – Shutterstock.com. 2437175175*

Listrik statis merupakan fenomena yang terjadi ketika suatu benda memperoleh muatan listrik. Muatan listrik ini disebabkan oleh ketidakseimbangan jumlah proton dan elektron pada atom. Pada inti atom terdapat muatan positif (proton) dan muatan netral (neutron). Jika suatu benda memiliki jumlah proton yang sama dengan jumlah elektron, maka benda tersebut bersifat netral. Namun, jika terdapat ketidakseimbangan antara jumlah proton dan elektron, benda tersebut akan memiliki muatan. Muatan listrik dapat berpindah antar benda melalui gesekan, seperti yang pertama kali ditemukan oleh Thales dari Miletus, seorang filsuf Yunani. Thales menemukan bahwa benda yang digosok dengan kain tertentu dapat menarik benda ringan lainnya, yang kemudian dikenal sebagai fenomena listrik statis. Berikut adalah formula muatan listrik:

$$Q = \text{Muatan Listrik}$$

### Contoh Soal

Seorang siswa melakukan percobaan dengan menggosokkan penggaris plastik ke rambutnya, kemudian mendekatkannya pada potongan kertas kecil sehingga kertas tersebut tertarik. Jika fenomena ini dijelaskan berdasarkan konsep listrik statis, bagaimana Anda menjelaskan hubungan antara ketidakseimbangan muatan pada penggaris dengan gaya tarik yang muncul terhadap potongan kertas? Sertakan alasan ilmiah yang mendasarinya.

#### Pembahasan:

Ketika penggaris plastik digosokkan ke rambut, terjadi perpindahan elektron dari rambut ke penggaris. Akibatnya, penggaris menjadi bermuatan negatif (kelebihan elektron), sedangkan rambut menjadi bermuatan positif (kekurangan elektron). Potongan kertas awalnya netral, tetapi ketika penggaris bermuatan negatif didekatkan, distribusi elektron dalam atom-atom kertas mengalami pergeseran (terjadi induksi). Elektron dalam kertas terdorong menjauhi penggaris, sementara sisi kertas yang lebih dekat ke penggaris menjadi relatif bermuatan positif. Perbedaan muatan inilah yang menimbulkan gaya tarik elektrostatis antara penggaris dan potongan kertas. Fenomena ini menunjukkan bagaimana ketidakseimbangan muatan dapat menghasilkan gaya interaksi yang nyata dalam kehidupan sehari-hari.





## 2. Hukum Coulomb

Charles Augustin de Coulomb, seorang ilmuwan dari Prancis, pertama kali mempelajari hubungan antara gaya listrik dan muatan listrik. Dalam eksperimennya, Coulomb menemukan bahwa gaya interaksi antara dua benda bermuatan listrik sebanding dengan hasil kali muatan-muatan tersebut dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan tersebut. Hukum ini dikenal dengan nama hukum Coulomb.

Formula:

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

Dengan:

$F$  = gaya Coulomb (N)

$q_1, q_2$  = muatan listrik (C)

$r$  = jarak antara kedua muatan (m)

$k$  = konstanta Coulomb ( $9 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$ )

Arah gaya Coulomb tergantung pada jenis muatannya:

- 1) Jika muatan-muatan tersebut sejenis, gaya yang timbul adalah gaya tolak menolak.
- 2) Jika muatan-muatan tersebut berlainan jenis, gaya yang timbul adalah gaya tarik menarik.



Charles de coulomb – Wikipedia.org

### Contoh Soal

Dua partikel bermuatan listrik masing-masing  $q_1 = +4 \times 10^{-6} \text{ C}$  dan  $q_2 = -6 \times 10^{-6} \text{ C}$  ditempatkan pada jarak 3 m. Seorang siswa diminta menjelaskan tidak hanya besar gaya Coulomb yang dialami kedua muatan, tetapi juga arah gaya yang bekerja pada masing-masing muatan. Bagaimana penjelasan siswa tersebut seharusnya, dan mengapa arah gaya menjadi aspek penting dalam memahami interaksi listrik menurut hukum Coulomb?

### Pembahasan:

Berdasarkan hukum Coulomb:

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

$$F = (9 \times 10^9) \frac{(4 \times 10^{-6})(6 \times 10^{-6})}{3^2}$$

$$F = (9 \times 10^9) \frac{24 \times 10^{-12}}{9}$$

$$F = (9 \times 10^9)(2.67 \times 10^{-12})$$

$$F \approx 0.024 \text{ N}$$

Besar gaya Coulomb antara kedua muatan adalah  $0.024\text{ N}$ . Karena muatan  $q_1$  positif dan  $q_2$  negatif, keduanya akan saling tarik-menarik. Arah gaya pada  $q_1$  adalah menuju  $q_2$ , sedangkan arah gaya pada  $q_2$  adalah menuju  $q_1$ .

Aspek arah penting karena hukum Coulomb tidak hanya menjelaskan besarnya gaya, tetapi juga sifat interaksi yang muncul. Dengan memahami arah gaya, siswa dapat menjelaskan fenomena fisik secara lebih lengkap, misalnya bagaimana sistem muatan bergerak, apakah mendekat atau menjauh, serta kaitannya dengan energi potensial listrik dalam sistem tersebut.



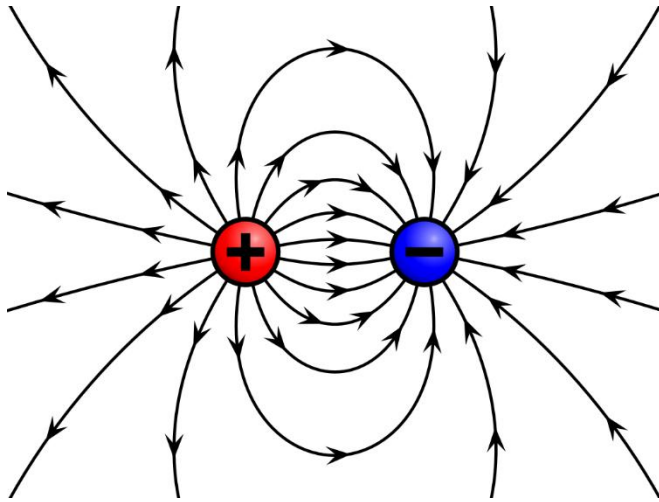
#### Fakta Fisika di Sekitarmu



Meski gaya listrik superkuat, alam terlihat tenang karena muatan positif dan negatif di alam semesta hampir seimbang sempurna. Kalau ada selisih kecil saja, bumi bisa hancur karena gaya Coulomb yang luar biasa besar.



### 3. Medan Listrik



Ilustrasi medan listrik di sekitar muatan positif (merah) dan negatif (biru) – Wikipedia.org

Ketika dua benda bermuatan listrik saling berdekatan, keduanya akan berinteraksi melalui gaya tarik-menarik atau tolak-menolak. Jenis interaksi ini ditentukan oleh tanda muatannya yaitu, muatan sejenis akan tolak-menolak, sedangkan muatan yang berbeda jenis akan tarik-menarik. Jika muatan tersebut dijauhkan, pengaruh gaya tetap ada pada daerah di sekitar muatan. Daerah inilah yang disebut medan listrik.

Medan listrik merupakan daerah di sekitar muatan yang masih dipengaruhi gaya listrik. Besaran yang digunakan untuk menyatakan kuat atau lemahnya medan listrik adalah kuat medan listrik ( $E$ ). Garis-garis medan listrik digambarkan keluar dari muatan positif dan masuk ke muatan negatif. Semakin rapat garis-garis medan listrik, semakin besar pula nilai kuat medan listrik pada daerah tersebut.

#### Medan Listrik Akibat Beberapa Muatan

Apabila di suatu titik terdapat lebih dari satu sumber muatan, kuat medan listrik total merupakan resultan dari masing-masing medan listrik.

##### a. Untuk dua muatan tak sejenis

$$E = E_1 + E_2 = k \frac{q_1}{r_1^2} + k \frac{q_2}{r_2^2}$$

##### b. Untuk dua muatan sejenis yang simetris

$$E = E_1 - E_2 = k \frac{q_1}{r_1^2} - k \frac{q_2}{r_2^2}$$

#### Medan Listrik pada Titik Sudut Segitiga

Jika ada muatan di titik-titik sudut segitiga, maka kuat medan listrik di salah satu titik sudut ditentukan dengan resultan vektor dari masing-masing medan listrik.

$$E_c = \sqrt{E_A^2 + E_B^2 + 2E_A E_B \cos \alpha}$$

dengan:

$E_A$  = medan listrik oleh muatan A

$E_B$  = medan listrik oleh muatan B

$\alpha$  = sudut antara  $E_A$  dan  $E_B$

$E_c$  = resultan medan listrik di titik C

#### Medan Listrik pada Bola Konduktor

Jika sebuah bola konduktor berongga diberi muatan, maka muatan listrik akan terkumpul merata di permukaan luar bola. Akibatnya:

- a. Di dalam bola ( $r < R$ ), kuat medan listrik = 0
- b. Di permukaan bola ( $r = R$ ), kuat medan listrik:

$$E = k \frac{q}{R^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2}$$

- c. Di luar bola ( $r > R$ ), medan listrik sama dengan medan dari sebuah muatan titik di pusat bola:

$$E = k \frac{q}{r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

## Fluks Listrik dan Hukum Gauss

Fluks listrik adalah banyaknya garis medan listrik yang menembus suatu bidang. Secara matematis:

$$\Phi = E \cdot A \cos \theta$$

dengan:

$\Phi$  = fluks listrik (Wb)

$E$  = kuat medan listrik (N/C)

$A$  = luas bidang ( $m^2$ )

$\theta$  = sudut antara  $E$  dan  $A$

Hukum Gauss menyatakan: jumlah garis medan listrik yang menembus permukaan tertutup sebanding dengan jumlah muatan listrik yang dilingkupi permukaan itu.

$$\Phi = \frac{q}{\epsilon_0}$$

dengan  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} C^2/N \cdot m^2$

## Medan Listrik antara Dua Keping Sejajar Bermuatan

Jika dua keping sejajar bermuatan sejenis dengan luas yang sama, maka garis-garis medan listrik akan tegak lurus dari keping positif menuju keping negatif.

Besarnya rapat muatan permukaan:

$$\sigma = \frac{q}{A}$$

Kuat medan listrik di antara keping:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_0 A}$$

Jika medium di antara keping bukan udara, tetapi memiliki konstanta dielektrik  $K$ , maka:

$$E = K \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{q}{AK\epsilon_0}$$

dengan:

$\sigma$  = rapat muatan ( $C/m^2$ )

$A$  = luas keping ( $m^2$ )

$K$  = konstanta dielektrik



### Contoh Soal

Sebuah bola konduktor berongga dengan jari-jari  $R = 0,2 \text{ m}$  diberi muatan  $q = 4 \times 10^{-9} \text{ C}$ . Seorang siswa diminta menganalisis kuat medan listrik pada tiga titik berbeda:

1. Titik P berada di dalam bola pada jarak  $r = 0,1 \text{ m}$ .
2. Titik Q berada di permukaan bola ( $r = R$ ).
3. Titik R berada di luar bola pada jarak  $r = 0,4 \text{ m}$ .

Bagaimana siswa tersebut harus menjelaskan besar kuat medan listrik di masing-masing titik sekaligus memberikan alasan ilmiah mengapa hasil di titik P berbeda dengan di titik Q dan R?

### Pembahasan:

Pada bola konduktor berongga, muatan hanya terkumpul di permukaan luar bola. Akibatnya:

- 1) Di dalam bola ( $r < R$ )

Medan listrik = 0.

Karena gaya dari muatan pada seluruh permukaan bola saling meniadakan, titik P tidak dipengaruhi medan listrik meskipun bola bermuatan.

- 1) Di permukaan bola ( $r = R$ )

$$E = k \frac{q}{R^2}$$

$$E = (9 \times 10^9) \frac{4 \times 10^{-9}}{(0,2)^2}$$

$$E = (9 \times 10^9)(4 \times 10^{-9})/0,04$$

$$E = 36/0,04 = 900 \text{ N/C}$$

- 2) Di luar bola ( $r > R$ )

$$E = k \frac{q}{r^2}$$

$$E = (9 \times 10^9) \frac{4 \times 10^{-9}}{(0,4)^2}$$

$$E = 36/0,16 = 225 \text{ N/C}$$

### Kesimpulan:

- 1) Di dalam bola, medan listrik nol karena muatan hanya berada di permukaan.
- 2) Di permukaan bola, medan listrik bernilai maksimum (900 N/C).
- 3) Di luar bola, medan listrik menurun sebanding dengan kuadrat jarak (225 N/C).
- 4) Hasil ini menunjukkan pentingnya konsep distribusi muatan pada konduktor: walaupun bola bermuatan, daerah dalamnya tetap bebas medan listrik.



## 4. Energi Potensial dan Potensial Listrik

Energi potensial listrik adalah energi yang dimiliki muatan akibat posisinya dalam medan listrik. Usaha untuk memindahkan muatan dari titik a ke titik b diberikan oleh:

$$W_{ab} = -k \frac{qq'}{r} \left( \frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a} \right)$$

Jika muatan uji dipindahkan dari tak berhingga ke jarak  $r$ , maka energi potensial listriknya adalah:

$$EP = k \frac{qq'}{r}$$

### Potensial Listrik

Potensial listrik didefinisikan sebagai energi potensial per satuan muatan uji. Secara matematis:

$$V = \frac{EP}{q'} = k \frac{q}{r}$$

Satuannya adalah Volt (V), yang setara dengan Joule per Coulomb.

Hubungan antara usaha, muatan uji, dan beda potensial adalah:

$$W_{ab} = q'(V_a - V_b) = q'\Delta V$$

### Potensial Listrik pada Berbagai Kasus

#### a. Potensial akibat beberapa muatan titik

$$V_p = k \left( \frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \dots \right)$$

#### b. Potensial pada bola konduktor

▷ Dalam bola ( $r < R$ ):

$$V = \frac{kq}{R}$$

▷ Permukaan bola ( $r = R$ ):

$$V = \frac{kq}{R}$$

▷ Luar bola ( $r > R$ ):

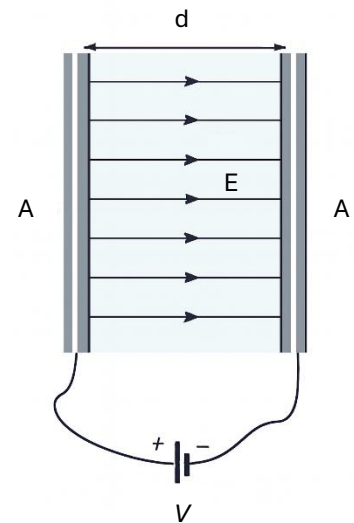
$$V = \frac{kq}{r}$$

#### c. Potensial pada keping sejajar

$$V = E \cdot d$$

Jika terdapat medium dielektrik:

$$V = \frac{qd}{AK\epsilon_0}$$



Ilustrasi dua pelat konduktor sejajar – Shutterstock.com

## Kekekalan Energi Mekanik dalam Medan Listrik

Muatan yang bergerak dalam medan listrik mengalami perubahan energi potensial dan energi kinetik. Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa jumlah energi potensial dan energi kinetik selalu konstan:

$$W = EK - EK$$

$$W = EP_1 - EP_2$$

Sehingga berlaku:

$$\frac{kqq'}{r_1} + \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{kqq'}{r_2} + \frac{1}{2}mv_2^2$$

atau secara umum:

$$EM = EP + EK = \text{konstan}$$

$$EM = k \cdot \frac{q_1 q_2}{r} + \frac{1}{2}mv^2$$

dimana:

EM = energi total

k = konstanta

$q_1$  dan  $q_2$  = muatan-muatan

r = jarak antara muatan

m = massa benda

v = kecepatan benda

### Contoh Soal

Sebuah partikel bermuatan  $q = +2 \times 10^{-6} \text{ C}$  dan bermassa  $m = 2 \times 10^{-3} \text{ kg}$  bergerak di bawah pengaruh muatan tetap  $Q = +4 \times 10^{-6} \text{ C}$  yang terletak di titik tetap. Pada awalnya, partikel berada pada jarak  $r_1 = 0,4 \text{ m}$  dari muatan Q dengan kecepatan awal  $v_1 = 0 \text{ m/s}$ . Hitung kecepatan partikel ketika berada pada jarak  $r_2 = 0,2 \text{ m}$ .

**Pembahasan:**

$$k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

$$Q = 4 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$q = 2 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$r_1 = 0,4 \text{ m}, r_2 = 0,2 \text{ m}$$

$$m = 2 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$v_1 = 0$$

Substitusi:

$$\frac{9 \times 10^9 (4 \times 10^{-6}) (2 \times 10^{-6})}{0,4} + 0$$

$$= \frac{9 \times 10^9 (4 \times 10^{-6}) (2 \times 10^{-6})}{0,2} + \frac{1}{2} (2 \times 10^{-3}) v_2^2$$

Hitung sisi kiri:

$$\frac{9 \times 10^9 \times 8 \times 10^{-12}}{0,4} = \frac{0,072}{0,4} = 0,18 \text{ J}$$

Sisi kanan (potensial di  $r_2$ ):

$$\frac{9 \times 10^9 \times 8 \times 10^{-12}}{0,2} = \frac{0,072}{0,2} = 0,36 \text{ J}$$

Maka persamaan:

$$0,18 = 0,36 + \frac{1}{2}(2 \times 10^{-3})v_2^2$$

$$0,18 - 0,36 = 0,001v_2^2$$

$$-0,18 = 0,001v_2^2$$

Hasilnya negatif, artinya pada kasus ini muatan Q dan q sama-sama positif (tolak-menolak), sehingga partikel tidak mungkin mendekat dari 0,4 m ke 0,2 m dengan sendirinya. Energi kinetik tidak bisa bernilai negatif. Dengan demikian, jawaban yang benar adalah partikel tidak dapat mencapai posisi  $r_2 = 0,2 \text{ m}$  kecuali ada gaya eksternal yang bekerja.



#### Fakta Fisika di Sekitarmu

Antara permukaan bumi dan ionosfer ada beda potensial sekitar 300.000 Volt. Itulah sebabnya petir bisa menyambar dengan energi luar biasa besar. Satu sambaran petir bisa melepaskan energi setara dengan jutaan lampu 100 watt menyala selama berjam-jam.



Sambaran petir - Shutterstock.com. 2625084441





## 5. Kapasitor dan Prinsip Kerjanya

Kapasitor adalah komponen listrik yang dapat menyimpan muatan listrik. Struktur dari kapasitor terdiri atas dua pelat konduktor yang dipisahkan oleh bahan isolator, yang disebut dielektrik. Kapasitor dapat menyimpan muatan listrik hingga batas kapasitas maksimum yang ditentukan oleh ukuran kapasitor tersebut.

Kapasitas kapasitor didefinisikan sebagai perbandingan antara muatan listrik yang tersimpan dalam kapasitor dengan beda potensial antara kedua pelat konduktor. Besaran kapasitas ini dinyatakan dalam satuan Farad (F), dan dapat dihitung dengan rumus:

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

dengan:

C = kapasitas kapasitor (Farad),

q = muatan yang tersimpan pada kapasitor (Coulomb),

V = beda potensial antara dua pelat konduktor (Volt).

### Kapasitor Pelat Sejajar

Kapasitor pelat sejajar terdiri dari dua pelat konduktor yang dipisahkan oleh bahan dielektrik. Jika kedua pelat memiliki muatan yang berlawanan, maka tercipta beda potensial antara pelat tersebut. Kapasitas kapasitor pelat sejajar dapat dihitung dengan rumus:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

dengan:

A = luas masing-masing pelat,

d = jarak antara kedua pelat,

$\epsilon_0$  = permitivitas vakum.

Ketika bahan dielektrik di antara kedua pelat, kapasitas kapasitor akan meningkat sesuai dengan konstanta dielektriknya. Rumus kapasitas kapasitor dengan dielektrik dapat ditulis sebagai:

$$C = \frac{K \epsilon_0 A}{d}$$

Dimana K adalah konstanta dielektrik dari bahan yang digunakan.

### Kapasitor Bola Konduktor

Kapasitor bola konduktor adalah jenis kapasitor yang menggunakan bola konduktor sebagai pelatnya. Muatan listrik q diberikan pada bola, sehingga timbul beda potensial V. Kapasitas kapasitor bola konduktor dihitung dengan rumus:

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

Karena beda potensial antara bola konduktor dan permukaan sekitarnya dapat dihitung dengan menggunakan hukum Coulomb, maka rumus kapasitas bola konduktor menjadi:

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0 r}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

### Energi dalam Kapasitor

Salah satu fungsi kapasitor adalah menyimpan energi listrik. Energi yang tersimpan dalam kapasitor dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

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

dengan:

$W$  = energi yang tersimpan dalam kapasitor (Joule),

$C$  = kapasitas kapasitor (Farad),

$V$  = beda potensial (Volt).

### Susunan Kapasitor dalam Rangkaian

Kapasitor dapat disusun dalam rangkaian baik secara seri maupun paralel.

#### a. Susunan Seri

Kapasitor yang disusun secara seri akan menghasilkan kapasitas pengganti yang lebih kecil, dihitung dengan rumus:

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

#### b. Susunan Paralel

Kapasitor yang disusun secara paralel akan menghasilkan kapasitas pengganti yang lebih besar, dihitung dengan rumus:

$$C_{\text{total}} = C_1 + C_2 + \dots$$

### Contoh Soal

Sebuah kapasitor pelat sejajar memiliki dua pelat konduktor dengan luas masing-masing  $5 \text{ cm}^2$  yang dipisahkan oleh jarak  $2 \text{ mm}$ . Di antara pelat tersebut terdapat bahan dielektrik dengan konstanta dielektrik  $K = 3$ . Jika permitivitas vakum  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ , hitunglah kapasitas kapasitor tersebut!

#### Pembahasan:

Diketahui:

- Luas pelat  $A = 5 \text{ cm}^2 = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
- Jarak antara pelat  $d = 2 \text{ mm} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$
- Konstanta dielektrik  $K = 3$
- Permitivitas vakum  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

Rumus kapasitas kapasitor pelat sejajar dengan dielektrik adalah:

$$C = \frac{K\epsilon_0 A}{d}$$

Substitusi nilai-nilai yang diketahui:

$$C = \frac{3 \times (8,85 \times 10^{-12}) \times (5 \times 10^{-4})}{2 \times 10^{-3}}$$

$$C = \frac{1,3275 \times 10^{-15}}{2 \times 10^{-3}}$$

$$C = 6,6375 \times 10^{-13} \text{ F} = 0,66375 \text{ pF}$$

Maka, kapasitas kapasitor tersebut adalah 0,66375 pF.

## Kegiatan Kelompok

### Interaksi Antara Muatan Listrik

#### Langkah Kerja

- 1) Bentuk kelompok kecil beranggotakan 3–4 orang.
- 2) Gosok sisir plastik dengan rambut atau kain kering beberapa detik. Dekatkan ke potongan kertas kecil, lalu amati.
- 3) Gosok dua penggaris plastik dengan kain wol. Gantung salah satunya dengan benang, kemudian dekatkan penggaris lainnya. Amati gerak penggaris yang digantung.
- 4) Gosok batang kaca dengan kain sutra. Dekatkan batang kaca tersebut ke penggaris plastik yang telah digosok kain wol dan digantung dengan benang. Amati interaksi yang terjadi.

**Tabel Analisis Hasil Pengamatan**

No	Pasangan Benda yang Didekatkan	Hasil Pengamatan (Tarik/Tolak/Netral)	Kesimpulan Interaksi
1	Sisir plastik – potongan kertas		
2	Penggaris plastik – penggaris plastik		
3	Batang kaca – penggaris plastik		

#### Pertanyaan Analisis

- 1) Apa yang terjadi ketika sisir plastik yang digosok dengan rambut/kain didekatkan ke potongan kertas? Jelaskan alasannya.
- 2) Mengapa dua penggaris plastik yang sama-sama digosok kain wol saling tolak-menolak?
- 3) Bagaimana interaksi antara batang kaca yang digosok kain sutra dengan penggaris plastik yang digosok kain wol? Apa artinya tentang muatan kedua benda tersebut?
- 4) Hubungkan hasil percobaan dengan konsep muatan sejenis dan muatan tidak sejenis.
- 5) Bagaimana kegiatan ini menunjukkan adanya gaya listrik sesuai hukum Coulomb?

## Rangkuman

### 1) Konsep Listrik Statis dan Muatan Listrik

Listrik statis terjadi akibat ketidakseimbangan jumlah proton dan elektron dalam suatu benda. Muatan listrik dapat berpindah melalui gesekan, seperti pada eksperimen Thales.

$$Q = \text{Muatan Listrik}$$

### 2) Hukum Coulomb

Hukum Coulomb menjelaskan bahwa gaya listrik antara dua muatan sebanding dengan hasil kali muatannya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya. Arah gaya bergantung pada jenis muatannya, tolak-menolak untuk muatan sejenis dan tarik-menarik untuk muatan berbeda jenis.

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

### 3) Medan Listrik

Medan listrik adalah daerah di sekitar muatan yang masih dipengaruhi gaya listrik. Kuat medan listrik bergantung pada besar muatan dan jaraknya, dan dapat dihitung dengan prinsip superposisi.

a. Dua muatan tak sejenis:  $E = E_1 + E_2 = k \frac{q_1}{r_1^2} + k \frac{q_2}{r_2^2}$

b. Dua muatan sejenis simetris:  $E = E_1 - E_2 = k \frac{q_1}{r_1^2} - k \frac{q_2}{r_2^2}$

c. Titik sudut segitiga:  $E_c = \sqrt{E_A^2 + E_B^2 + 2E_A E_B \cos \alpha}$

d. Bola konduktor:

▷  $E = 0$  untuk  $r < R$

▷  $E = k \frac{q}{R^2} = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 R^2}$  untuk  $r = R$

▷  $E = k \frac{q}{r^2} = \frac{q}{4\pi \epsilon_0 r^2}$  untuk  $r > R$

▷ Fluks listrik:  $\Phi = E \cdot A \cos \theta$

e. Hukum Gauss:  $\Phi = \frac{q}{\epsilon_0}$

f. Keping sejajar:  $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_0 A}$  atau  $E = \frac{q}{AK\epsilon_0}$

### 4) Energi Potensial dan Potensial Listrik

Energi potensial listrik timbul karena posisi muatan dalam medan listrik, sedangkan potensial listrik adalah energi potensial per satuan muatan. Energi mekanik dalam medan listrik selalu kekal.

a. Usaha:  $W_{ab} = -k \frac{qq'}{r} \left( \frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a} \right)$

b. Energi potensial:  $EP = k \frac{qq'}{r}$

c. Potensial:  $V = \frac{EP}{q'} = k \frac{q}{r}$

d. Beda potensial:  $W_{ab} = q'(V_a - V_b)$

e. Potensial beberapa muatan:  $V_p = k \left( \frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \dots \right)$

f. Kekekalan energi:



$$\triangleright \frac{kqq'}{r_1} + \frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{kqq'}{r_2} + \frac{1}{2}mv_2^2$$

$$\triangleright EM = EP + EK = \text{konstan}$$

#### 5) Kapasitor dan Prinsip Kerjanya

Kapasitor menyimpan muatan listrik dengan cara menampung beda potensial pada dua pelat konduktor yang dipisahkan bahan dielektrik. Kapasitas dipengaruhi oleh ukuran pelat, jarak, dan bahan isolator.

a. Kapasitas:  $C = \frac{q}{V}$

b. Kapasitor pelat sejajar:  $C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$  atau  $C = \frac{K\epsilon_0 A}{d}$

c. Energi kapasitor:  $W = \frac{1}{2}CV^2$

d. Susunan seri:  $\frac{1}{C_{\text{total}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$

e. Susunan paralel:  $C_{\text{total}} = C_1 + C_2 + \dots$

### Latihan Soal

1. Dua muatan listrik masing-masing  $q_1 = 2 \times 10^{-6} \text{ C}$  dan  $q_2 = 3 \times 10^{-6} \text{ C}$  dipisahkan sejauh  $r = 0,2 \text{ m}$ . Besar gaya Coulomb antara kedua muatan adalah ....
  - A. 1,35 N
  - B. 1,50 N
  - C. 1,80 N
  - D. 2,00 N
  - E. 2,25 N
2. Medan listrik di suatu titik akibat muatan  $q = 4 \times 10^{-6} \text{ C}$  yang berada pada jarak  $0,1 \text{ m}$  dari titik tersebut adalah .... ( $k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ )
  - A.  $2,4 \times 10^6 \text{ N/C}$
  - B.  $3,6 \times 10^6 \text{ N/C}$
  - C.  $4,5 \times 10^6 \text{ N/C}$
  - D.  $5,2 \times 10^6 \text{ N/C}$
  - E.  $6,0 \times 10^6 \text{ N/C}$
3. Dua keping sejajar bermuatan memiliki luas  $A = 0,02 \text{ m}^2$  dan jarak  $d = 0,005 \text{ m}$ . Jika permitivitas vakum  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ , maka kapasitas kapasitor yang terbentuk adalah ....
  - A.  $2,5 \times 10^{-11} \text{ F}$
  - B.  $3,5 \times 10^{-11} \text{ F}$
  - C.  $4,0 \times 10^{-11} \text{ F}$
  - D.  $5,0 \times 10^{-11} \text{ F}$
  - E.  $6,2 \times 10^{-11} \text{ F}$
4. Energi potensial listrik antara dua muatan  $q = 2 \times 10^{-6} \text{ C}$  dan  $q' = 3 \times 10^{-6} \text{ C}$  yang dipisahkan sejauh  $0,3 \text{ m}$  adalah ....
  - A. 0,10 J
  - B. 0,12 J
  - C. 0,15 J
  - D. 0,18 J
  - E. 0,20 J
5. Sebuah kapasitor dengan kapasitas  $C = 5 \mu\text{F}$  dihubungkan dengan tegangan  $V = 12 \text{ V}$ . Energi listrik yang tersimpan dalam kapasitor adalah ....
  - A.  $2,5 \times 10^{-4} \text{ J}$
  - B.  $3,6 \times 10^{-4} \text{ J}$
  - C.  $4,0 \times 10^{-4} \text{ J}$
  - D.  $5,2 \times 10^{-4} \text{ J}$
  - E.  $6,0 \times 10^{-4} \text{ J}$

6. Jika tiga kapasitor masing-masing  $C_1 = 6 \mu F$ ,  $C_2 = 3 \mu F$ , dan  $C_3 = 2 \mu F$  disusun secara paralel, maka kapasitas total rangkaian adalah ....
- A.  $8 \mu F$
  - B.  $9 \mu F$
  - C.  $10 \mu F$
  - D.  $11 \mu F$
  - E.  $12 \mu F$
7. Potensial listrik pada titik yang berjarak  $r = 0,2 \text{ m}$  dari muatan titik  $q = 5 \times 10^{-6} \text{ C}$  adalah ....
- A.  $1,5 \times 10^5 \text{ V}$
  - B.  $2,0 \times 10^5 \text{ V}$
  - C.  $2,25 \times 10^5 \text{ V}$
  - D.  $2,5 \times 10^5 \text{ V}$
  - E.  $3,0 \times 10^5 \text{ V}$

Akses latihan soal  
lainnya di sini yuk!



Latihan Soal Fisika  
Kelas 12 BAB 1

## Referensi

Giancoli, D. C. (2014). *Physics: Principles with applications* (7th ed.). Pearson Education.

Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2013). *Fundamentals of physics* (10th ed.). Wiley.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2019). *Physics for scientists and engineers* (10th ed.). Cengage Learning.

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Physics for scientists and engineers* (6th ed.). W. H. Freeman.

Young, H. D., Freedman, R. A., & Ford, A. L. (2016). *University physics with modern physics* (14th ed.). Pearson.



## BAB 2: LISTRIK DINAMIS

### Karakter Pelajar Pancasila

Bergotong-royong, Bernalar kritis,  
dan Kreatif

**Kata Kunci:** Ampere meter, arus listrik, daya listrik, energi listrik, hambatan jenis, hukum Ohm, hukum I Kirchhoff.

**Tujuan Pembelajaran: Memahami dan Menerapkan Konsep Arus Listrik Searah Beserta Prinsip-Prinsipnya**

### 1. Mengidentifikasi fenomena arus listrik dan rapat arus listrik

- ▷ Mengamati bagaimana arus listrik dapat mengalir melalui konduktor.
- ▷ Memahami pengaruh rapat arus terhadap material yang dilalui oleh arus listrik.

### 2. Menganalisis penyebab munculnya arus listrik dan faktor-faktor penghambatnya

- ▷ Menyusun hubungan antara perbedaan potensial dan aliran arus.
- ▷ Mengidentifikasi faktor-faktor yang dapat menghambat aliran arus seperti resistansi dan bahan penghantar.

**3. Mendeskripsikan hambatan listrik, konsep tegangan jepit, gaya gerak listrik, energi listrik, dan daya listrik**

- ▷ Menjelaskan bagaimana hambatan listrik mempengaruhi distribusi arus dalam suatu rangkaian.
- ▷ Memahami keterkaitan antara energi listrik, daya, dan tegangan dalam pengoperasian alat listrik.

**4. Menjelaskan hukum Ohm dan hukum Kirchhoff dalam rangkaian arus searah**

- ▷ Menggunakan hukum Ohm untuk menghitung tegangan, arus, dan hambatan dalam rangkaian.
- ▷ Mengaplikasikan hukum Kirchhoff untuk menganalisis rangkaian listrik lebih kompleks.

**5. Menganalisis sifat rangkaian listrik arus searah dan penerapannya dalam teknologi**

- ▷ Memahami bagaimana prinsip dasar rangkaian listrik diterapkan dalam berbagai perangkat teknologi.
- ▷ Mengkaji aplikasi rangkaian arus searah dalam perangkat elektronik sehari-hari.

**6. Menganalisis prinsip kerja alat ukur listrik arus searah berikut keselamatannya dalam kehidupan sehari-hari**

- ▷ Menjelaskan cara penggunaan alat ukur seperti voltmeter dan ammeter.
- ▷ Memastikan keselamatan dalam penggunaan alat ukur listrik dalam kehidupan sehari-hari.

**7. Melakukan percobaan prinsip kerja rangkaian listrik arus searah dan mempresentasikan hasil percobaan**

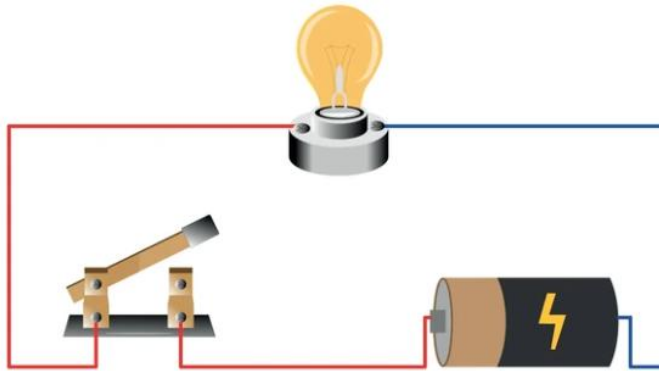
- ▷ Melakukan eksperimen untuk mengukur tegangan, arus, dan hambatan dalam rangkaian arus searah.
- ▷ Menganalisis dan menyajikan hasil percobaan dalam bentuk laporan yang terstruktur dengan baik.

F I T R I





## 1. Arus Listrik dan Perbedaan Potensial



Susunan rangkaian listrik yang sederhana –  
Shutterstock.com. 2659244567

Arus listrik mengalir karena adanya perbedaan potensial listrik antara dua titik yang dihubungkan melalui penghantar. Jika terdapat dua benda dengan beda potensial yang berbeda, dan benda-benda tersebut dihubungkan dengan penghantar, maka arus listrik akan mengalir. Arus listrik adalah aliran muatan yang bergerak dari potensial tinggi menuju potensial rendah. Arah arus listrik berlawanan dengan arah pergerakan elektron. Perbedaan potensial antara dua titik ini menyebabkan terjadinya aliran arus listrik.

Secara matematis, kuat arus listrik ( $I$ ) dihitung menggunakan rumus berikut:

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

dengan:

$q$  = muatan listrik (Coulomb),

$t$  = waktu (detik),

$I$  = kuat arus listrik (Ampere).

### Rapat Arus Listrik

Rapat arus listrik adalah arus yang mengalir per satuan luas penampang penghantar. Dalam hal ini, banyaknya muatan yang mengalir dapat dihitung dengan rumus:

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

dengan:

$I$  = kuat arus listrik (Ampere),

$A$  = luas penampang penghantar ( $m^2$ ),

$J$  = rapat arus listrik ( $A/m^2$ ).

Untuk menghitung jumlah muatan listrik yang mengalir, kita menggunakan rumus:

$$n = \frac{q}{e}$$

dengan:

$q$  = muatan listrik (Coulomb),

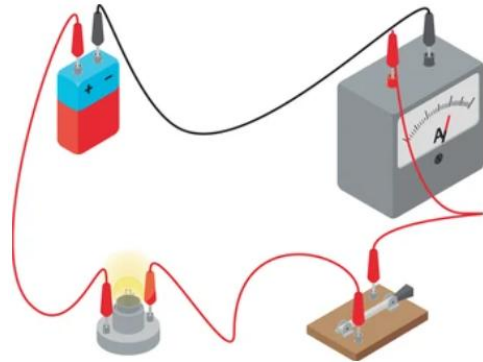
$e$  = muatan listrik sebuah elektron ( $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ),

$n$  = jumlah elektron yang mengalir.

## Pengukuran Kuat Arus Listrik

Kuat arus listrik diukur menggunakan alat yang disebut amperemeter. Amperemeter dipasang secara seri dalam rangkaian untuk mengukur besar arus yang mengalir. Hasil pengukuran ini menunjukkan seberapa besar arus yang mengalir dalam rangkaian tersebut. Penggunaan amperemeter memungkinkan kita untuk mengukur kuat arus yang mengalir pada berbagai titik dalam rangkaian.

*Susunan rangkaian listrik sederhana isometrik dengan amperemeter – Shutterstock.com.1958057782*



## Pengukuran Beda Potensial Listrik

Untuk mengukur beda potensial listrik dalam suatu rangkaian, digunakan voltmeter. Alat ini dipasang secara paralel dengan komponen yang ingin diukur beda potensialnya. Secara umum, voltmeter digunakan untuk mengukur tegangan antara dua titik dalam rangkaian listrik.



### Fakta Fisika di Sekitarmu

#### Prinsip kerja berbeda-beda

Voltmeter analog biasanya bekerja berdasarkan gaya defleksi jarum akibat interaksi medan magnet dan arus kecil, sedangkan voltmeter digital bekerja dengan mengubah sinyal listrik menjadi data numerik melalui ADC (Analog to Digital Converter).



*Voltmeter – Shutterstock.com*

### Contoh Soal

Sebuah kawat penghantar dialiri arus listrik sebesar 2 A selama 5 menit. Hitunglah berapa banyak elektron yang mengalir melalui kawat tersebut!

#### Pembahasan:

Diketahui:

$$I = 2 \text{ A}$$

$$t = 5 \text{ menit} = 5 \times 60 = 300 \text{ s}$$

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Langkah pertama, hitung muatan listrik yang mengalir menggunakan rumus:

$$q = I \times t = 2 \times 300 = 600 \text{ C}$$

Selanjutnya, hitung jumlah elektron dengan rumus:

$$n = \frac{q}{e} = \frac{600}{1,6 \times 10^{-19}}$$

$$n = 3,75 \times 10^{21} \text{ elektron}$$



## 2. Hukum Ohm

Seorang ilmuwan fisika bernama George Simon Ohm (1789–1854) menyelidiki hubungan antara kuat arus listrik dan beda potensial pada suatu penghantar. Berdasarkan hasil penelitiannya, Ohm menyatakan bahwa kuat arus listrik yang mengalir pada suatu penghantar sebanding dengan beda potensial pada ujung-ujung penghantar. Oleh karena itu, jika kita mengetahui besar tegangan dan hambatan dalam suatu rangkaian, maka kita dapat menghitung besar arus listrik yang mengalir.

Secara matematis, hubungan antara beda potensial dan kuat arus listrik dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$V = I R$$

dengan:

$V$  = beda potensial pada ujung penghantar (Volt),

$I$  = kuat arus listrik (Ampere),

$R$  = hambatan listrik (Ohm).



Georg Simon Ohm – Wikipedia.org

### Hambatan Listrik dan Resistor Jenis

Hambatan listrik atau resistansi adalah kemampuan suatu bahan untuk menghambat atau mencegah aliran arus listrik. Berdasarkan hukum Ohm yang telah dibahas sebelumnya, hambatan listrik berbanding terbalik dengan kuat arus listrik. Dengan demikian, semakin besar hambatan listrik, maka kecil arus listrik yang dapat mengalir pada rangkaian tersebut.

Hambatan jenis adalah resistivitas atau ukuran kemampuan suatu bahan untuk mengalirkan arus listrik. Semakin besar hambatan jenisnya, maka kecil arus listrik yang dapat mengalir melalui penghantar tersebut. Sebaliknya, hambatan jenis yang lebih rendah akan memungkinkan arus listrik mengalir lebih besar.

Secara matematis, hubungan antara hambatan dan hambatan jenis dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

atau

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

dengan:

$\rho$  = hambatan jenis ( $\Omega \cdot m$ ),

$R$  = hambatan ( $\Omega$ ),

$L$  = panjang penghantar (m),

$A$  = luas penampang penghantar ( $m^2$ ).

## Dampak Perubahan Suhu terhadap Hambatan Listrik

Besar hambatan listrik suatu penghantar dipengaruhi oleh panjang kawat, luas penampang, dan hambatan jenis penghantar. Oleh karena itu, jika terjadi perubahan suhu, hubungan hambatan listrik dan suhu dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T)$$

dengan:

$R_0$  = hambatan pada suhu  $T_1$  ( $\Omega$ ),

$R$  = hambatan pada suhu  $T_2$  ( $\Omega$ ),

$\alpha$  = koefisien suhu ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$\Delta T$  = perubahan suhu ( $T_2 - T_1$ ).

### Contoh Soal

hambatan  $6\ \Omega$ . Hitunglah besar arus listrik yang mengalir pada rangkaian tersebut!

**Pembahasan:**

Diketahui:

$$V = 12\ \text{V}$$

$$R = 6\ \Omega$$

Rumus hukum Ohm:

$$V = I \times R$$

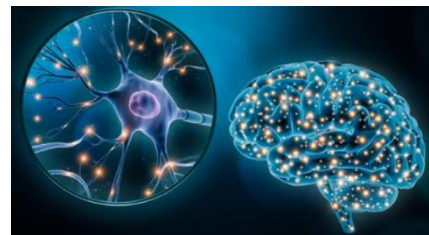
Maka arus listrik yang mengalir adalah:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{12}{6} = 2\ \text{A}.$$



### Fakta Fisika di Sekitarmu

Tubuh kita juga penuh listrik! Sinyal saraf otak ke otot bekerja dengan ion-ion bermuatan, mirip arus listrik di kabel. Tanpa arus biologis ini, kita nggak bisa bergerak atau berpikir.



Aktivitas neuron otak manusia –  
Shutterstock.com.1907619574



### 3. Hukum I Kirchhoff untuk Arus Listrik

#### Konsep Gerak Lurus Berubah Beraturan

Gustav Robert Kirchhoff (1824–1887), ilmuwan fisika asal Jerman, meneliti perilaku arus listrik dalam rangkaian bercabang. Ia menyimpulkan bahwa:

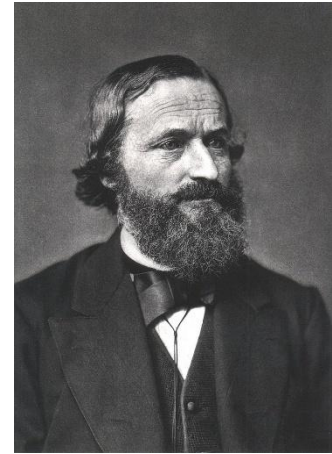
*Jumlah kuat arus listrik yang masuk ke suatu titik percabangan akan sama dengan jumlah kuat arus listrik yang keluar dari titik tersebut.*

Pernyataan ini dikenal dengan Hukum I Kirchhoff, yang merupakan penerapan dari prinsip kekekalan muatan listrik. Artinya, dalam sistem tertutup, jumlah muatan listrik tetap konstan dan tidak hilang. Secara matematis, hukum ini dapat dituliskan sebagai:

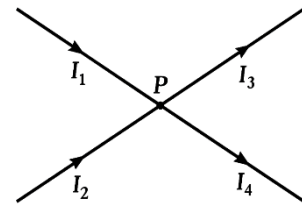
$$\sum I_{\text{masuk}} = \sum I_{\text{keluar}}$$

Sebagai contoh, pada titik cabang P, jika arus yang masuk adalah  $I_1$  dan  $I_2$ , serta arus yang keluar adalah  $I_3$  dan  $I_4$ , maka:

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$



Gustav Robert Kirchhoff –  
Wikipedia.org



Ilustrasi percabangan arus listrik

#### Contoh Soal

Tiga buah kawat penghantar terhubung pada sebuah titik cabang P. Arus yang masuk ke titik P masing-masing sebesar  $I_1 = 2A$  dan  $I_2 = 3A$ . Jika arus yang keluar dari titik tersebut adalah  $I_3 = 4A$ , tentukan besar arus listrik  $I_4$  yang juga keluar dari titik P!

#### Pembahasan:

Menurut Hukum I Kirchhoff, jumlah kuat arus yang masuk ke suatu titik percabangan akan sama dengan jumlah arus yang keluar, yaitu:

$$\sum I_{\text{masuk}} = \sum I_{\text{keluar}}$$

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$

Substitusikan nilai:

$$2A + 3A = 4A + I_4$$

$$5A = 4A + I_4$$

$$\Rightarrow I_4 = 1A$$

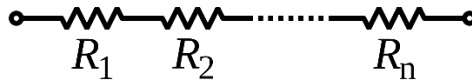
Besar arus  $I_4$  yang keluar dari titik P adalah 1 A.



## 4. Kombinasi Hambatan dalam Rangkaian

Komponen hambatan listrik dapat dirangkai dalam berbagai konfigurasi, seperti seri dan paralel. Pemahaman tentang bagaimana arus dan tegangan bekerja dalam susunan ini penting untuk merancang sirkuit elektronik.

### Penyusunan Hambatan Secara Seri



*Ilustrasi hambatan seri – Wikipedia.org*

Dalam rangkaian seri, arus listrik yang mengalir sama besar di setiap hambatan, sedangkan tegangan total dibagi di antara hambatan-hambatan tersebut. Misalnya, jika tiga buah hambatan  $R_1$ ,  $R_2$ , dan  $R_3$  disusun secara seri, maka berlaku:

#### a. Arus listrik yang mengalir di setiap hambatan

$$I_{ab} = I_{total} = I_1 = I_2 = I_3$$

#### b. Tegangan total pada rangkaian

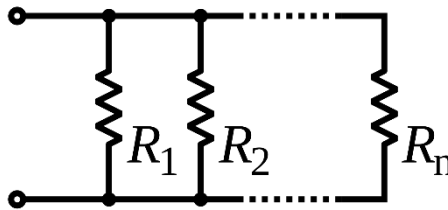
$$V_{ab} = V_{total} = V_1 + V_2 + V_3 \quad \text{atau} \quad V = \sum V$$

#### c. Hambatan total (pengganti) dari susunan seri

$$R_s = \sum R = R_1 + R_2 + R_3$$

### Penyusunan Hambatan Secara Paralel

Pada susunan paralel, tegangan di setiap hambatan sama, namun arus listrik terbagi ke setiap cabang.



*Ilustrasi hambatan paralel – Wikipedia.org*

#### a. Tegangan pada tiap hambatan

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



- b. Kuat arus total merupakan penjumlahan dari kuat arus di masing-masing cabang

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

- c. Hambatan pengganti dari susunan paralel

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

- d. Untuk mengetahui kuat arus pada masing-masing cabang berdasarkan perbandingan hambatan

$$I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}$$

Dari persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa jika hambatan disusun secara paralel, maka hambatan total rangkaian akan lebih kecil daripada hambatan terkecil yang ada dalam susunan tersebut. Selain itu, arus listrik yang mengalir pada setiap cabang akan lebih besar pada cabang yang memiliki hambatan lebih kecil.

### Contoh Soal

Tiga buah hambatan masing-masing  $R_1 = 6$ ,  $R_2 = 3$ , dan  $R_3 = 2$  disusun secara paralel. Hitunglah besar hambatan pengganti dari rangkaian tersebut!

#### Pembahasan:

Untuk susunan paralel, hambatan pengganti  $R_p$  dihitung dengan rumus:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2}$$

Samakan penyebut:

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{6} + \frac{2}{6} + \frac{3}{6} = \frac{6}{6} = 1$$

$$\Rightarrow R_p = 1$$

Besar hambatan pengganti  $R_p$  dari rangkaian paralel tersebut adalah 1  $\Omega$ .



## 5. Sumber Arus Listrik Tegangan Tetap

Alat yang mampu menghasilkan arus listrik searah disebut sebagai sumber arus. Syarat utama sumber arus searah adalah harus memiliki beda potensial (tegangan) yang tetap. Tegangan ini dapat berasal dari sumber tegangan luar seperti baterai, dan memiliki gaya gerak listrik (GGL) serta hambatan dalam.

Untuk memahami bagaimana sumber tegangan bekerja dalam rangkaian, kita dapat menyusunnya baik secara seri maupun paralel, seperti halnya susunan hambatan listrik. Kedua konfigurasi ini akan memengaruhi total tegangan dan arus yang dihasilkan oleh rangkaian.

### Konfigurasi Seri pada Sumber Tegangan

Jika beberapa sumber tegangan disusun secara seri seperti pada gambar, maka besar total GGL dan hambatan dalam total dapat dihitung **dengan:**

$$\varepsilon_s = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

Jika rangkaian tersebut dihubungkan dengan hambatan luar  $R$ , maka arus listrik total dapat dihitung **dengan:**

$$I = \frac{\varepsilon_s}{r_s + R}$$

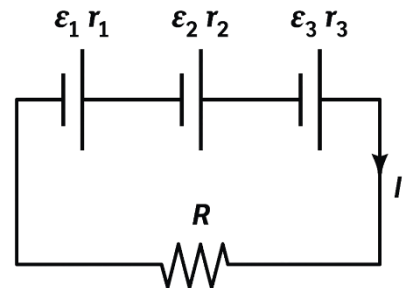
**dengan:**

$\varepsilon$  = GGL (Volt),

$r$  = hambatan dalam (Ohm),

$R$  = hambatan luar (Ohm),

$I$  = kuat arus (Ampere).



*Ilustrasi susunan sumber tegangan listrik secara seri*

### Konfigurasi Paralel pada Sumber Tegangan

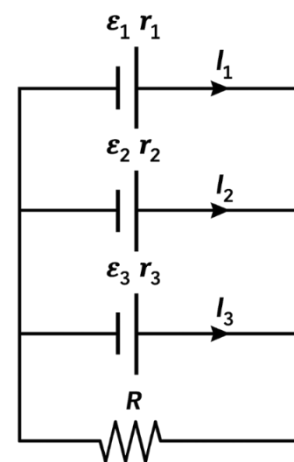
Pada susunan paralel, GGL total dan hambatan dalam gabungan mengikuti prinsip berbeda. Jika beberapa sumber tegangan identik disusun paralel (lihat gambar), maka:

GGL total adalah:

$$\frac{1}{r_p} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$$

Kuat arus listrik total yang mengalir pada rangkaian:

$$I = \frac{\varepsilon_p}{r_p + R}$$



*Ilustrasi susunan sumber tegangan listrik secara paralel*

Susunan ini berguna untuk memperkecil hambatan dalam, tanpa mengubah besar tegangan total.

### Contoh Soal

Sumber arus listrik searah memiliki syarat utama yaitu memiliki beda potensial yang tetap. Ketika sumber tegangan disusun dalam rangkaian, baik secara seri maupun paralel, kedua konfigurasi ini akan memengaruhi tegangan dan arus yang dihasilkan. Jelaskan bagaimana pengaruh penyusunan seri dan paralel terhadap tegangan total dan hambatan total pada sumber arus listrik searah!

#### Pembahasan:

##### Penyusunan Seri:

- Dalam penyusunan seri, tegangan total pada sumber arus adalah jumlah dari tegangan setiap sumber yang disusun. Artinya, jika ada beberapa baterai yang disusun seri, maka tegangan total akan bertambah.
- Hambatan total juga akan bertambah, karena setiap hambatan dalam sumber arus akan menambah hambatan total rangkaian. Akibatnya, arus total yang dihasilkan oleh rangkaian akan lebih kecil.

##### Penyusunan Paralel:

- Dalam penyusunan paralel, tegangan total yang dihasilkan oleh sumber arus tetap sama dengan tegangan satu sumber saja, meskipun banyak sumber tegangan yang disusun.
- Hambatan total berkurang, karena hambatan setiap sumber arus bekerja bersama untuk mengurangi hambatan total. Akibatnya, arus total yang dihasilkan akan lebih besar, meskipun tegangan tetap.

## 6. Hukum II Kirchhoff untuk Tegangan dalam Rangkaian Tertutup

Setelah memahami arus dalam percabangan, kini kita memasuki hukum yang berkaitan dengan tegangan dalam rangkaian tertutup. Hukum ini disebut Hukum II Kirchhoff. Pada dasarnya, hukum ini menyatakan bahwa:

*Jumlah seluruh tegangan (beda potensial) dalam satu loop tertutup bernilai nol.*

Artinya, dalam satu putaran penuh pada suatu rangkaian, energi listrik yang diberikan oleh sumber akan habis dipakai oleh seluruh hambatan di dalamnya.

Secara matematis dituliskan:

$$\sum \varepsilon + \sum iR = 0$$

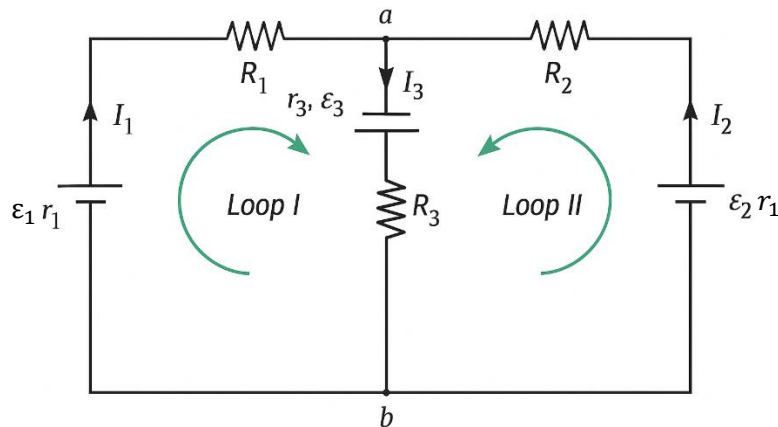
dengan:

$\varepsilon$  = GGL (Volt),

$i$  = arus listrik (Ampere),

$R$  = hambatan listrik (Ohm).

### Contoh Analisis Loop pada Rangkaian



*Ilustrasi rangkaian listrik dengan dua loop*

Perhatikan gambar berikut, yang menunjukkan dua loop dalam satu rangkaian. Dengan menerapkan Hukum II Kirchhoff pada masing-masing loop:

#### a. Loop I:

$$-\varepsilon_1 + \varepsilon_3 + I_1(R_1 + r_1) + I_3(R_3 + r_3) = 0$$

$$\Rightarrow I_1(R_1 + r_1) + I_3(R_3 + r_3) = \varepsilon_1 - \varepsilon_3$$

#### b. Loop II:

$$-\varepsilon_2 + \varepsilon_3 + I_2(R_2 + r_2) + I_3(R_3 + r_3) = 0$$

$$\Rightarrow I_2(R_2 + r_2) + I_3(R_3 + r_3) = \varepsilon_2 - \varepsilon_3$$

Jika diketahui hubungan  $I_2 = I_3 - I_1$ , maka semua arus dapat dihitung.

## Menghitung Tegangan Jepit

Untuk mencari besar tegangan jepit antara dua titik (misalnya antara a dan b), digunakan persamaan:

$$V_{ab} = \sum \varepsilon + \sum iR$$

Dan dalam kasus gambar di atas:

$$V_{ab} = I_3(R_3 + r_3) - \varepsilon_3$$

### Contoh Soal

Dalam rangkaian yang terdiri dari tiga sumber tegangan dan tiga hambatan, pada gambar berikut, diketahui nilai-nilai berikut:

GGL  $\varepsilon_1 = 12 \text{ V}$ ,  $\varepsilon_2 = 8 \text{ V}$ ,  $\varepsilon_3 = 5 \text{ V}$

Hambatan  $R_1 = 4 \text{ } \Omega$ ,  $R_2 = 6 \text{ } \Omega$ ,  $R_3 = 3 \text{ } \Omega$

Kuat arus  $I_1 = 2 \text{ A}$ ,  $I_2 = 1 \text{ A}$ ,  $I_3 = 3 \text{ A}$

Tentukan besar tegangan jepit  $V_{ab}$  antara titik a dan b dalam rangkaian!

#### Pembahasan:

Untuk mencari tegangan jepit antara dua titik, kita menggunakan persamaan Hukum Kirchhoff untuk tegangan:

$$V_{ab} = \sum \varepsilon + \sum iR$$

Dari soal diketahui:

$$V_{ab} = \varepsilon_3 + I_3 R_3$$

Dengan substitusi nilai yang diberikan:

$$V_{ab} = 5 \text{ V} + (3 \text{ A} \times 3 \text{ } \Omega)$$

$$V_{ab} = 5 \text{ V} + 9 \text{ V}$$

$$V_{ab} = 14 \text{ V}$$

Maka, tegangan jepit  $V_{ab}$  antara titik a dan b adalah 14 V.



## 7. Energi dan Daya Listrik

### Energi Listrik

Seiring dengan semakin banyaknya alat elektronik yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari, kita perlu memahami bagaimana cara kerja peralatan tersebut. Semua perangkat elektronik bekerja dengan adanya energi listrik, yang merupakan salah satu bentuk energi yang digunakan dalam banyak alat, baik itu gawai, peralatan rumah tangga, atau kendaraan listrik.

Energi listrik adalah energi yang dihasilkan oleh muatan listrik negatif (elektron) yang bergerak mengalir. Ketika muatan listrik bergerak, makin besar energi listrik yang dihasilkan. Sumber energi listrik dapat beragam, seperti baterai atau pembangkit listrik yang mengubah energi kimia menjadi energi listrik. Dalam suatu rangkaian tertutup, sumber energi listrik dapat menghantarkan energi untuk menggerakkan perangkat dalam rangkaian tersebut.

Persamaan Energi Listrik:

Energi listrik dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$W = qV$$

dengan:

$W$  = energi listrik (Joule),

$q$  = muatan listrik (Coulomb),

$V$  = beda potensial (Volt).

Berdasarkan hukum Ohm, energi listrik juga dapat dihitung dengan menggunakan hubungan arus listrik:

$$W = I^2 R t$$

dengan:

$I$  = kuat arus listrik (Ampere),

$R$  = hambatan listrik (Ohm),

$t$  = waktu (detik).

### Daya Listrik

Saat membeli peralatan elektronik, penting untuk mengetahui daya listrik yang digunakan oleh perangkat tersebut. Daya listrik adalah laju energi listrik yang dipindahkan atau digunakan per satuan waktu. Daya listrik yang digunakan oleh rangkaian dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$P = \frac{W}{t}$$

dengan:

$P$  = daya listrik (Watt),

$W$  = energi listrik (Joule),

$t$  = waktu (detik).

Jika hambatan dalam rangkaian tetap, daya listrik berhubungan dengan kuadrat tegangan atau arus listrik. Secara matematis, hubungan ini dapat dinyatakan **dengan**:

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

**dengan:**

P = daya listrik (Watt),

V = beda potensial (Volt),

I = kuat arus listrik (Ampere),

R = hambatan listrik (Ohm).

Jika hambatan berubah, daya listrik dapat dihitung dengan perbandingan antara dua keadaan yang berbeda, sebagai berikut:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2$$

**dengan:**

$P_1, P_2$  = daya listrik pada keadaan 1 dan 2,

$V_1, V_2$  = tegangan listrik pada keadaan 1 dan 2.

### Contoh Soal

Ketika Anda menggunakan sebuah peralatan elektronik seperti lampu pijar, penting untuk mengetahui daya listrik yang digunakan. Misalkan sebuah lampu pijar digunakan selama 10 detik dan mengkonsumsi energi listrik sebanyak 50 Joule. Hitunglah daya listrik yang digunakan oleh lampu pijar tersebut!

#### Pembahasan:

Daya listrik dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$P = \frac{W}{t}$$

**dengan:**

P = daya listrik (Watt),

W = energi listrik (Joule),

t = waktu (detik).

Dari soal diketahui:

W = 50 J,

t = 10 detik.

Maka, daya listrik yang digunakan oleh lampu pijar tersebut adalah:

$$P = \frac{50}{10} = 5 \text{ Watt}$$

Maka, daya listrik yang digunakan oleh lampu pijar tersebut adalah 5 Watt.





## 8. Berbagai Alat Ukur Listrik

### Amperemeter

Amperemeter digunakan untuk mengukur kuat arus listrik yang mengalir dalam suatu rangkaian. Ketika dipasang, amperemeter harus dipasang secara seri dengan rangkaian yang ingin diukur arusnya. Sebuah amperemeter yang ideal memiliki hambatan dalam yang sangat kecil, sehingga tidak mempengaruhi besar arus dalam rangkaian.

Namun, pada amperemeter nyata, hambatan dalam ( $r$ ) mungkin tidak nol. Untuk mengukur kuat arus listrik yang lebih besar, amperemeter sering dipasang dengan hambatan shunt ( $R_s$ ) secara paralel. Persamaan yang berlaku untuk amperemeter yang dipasang dengan shunt adalah:

$$V_s = I_s R_s$$

dengan:

$V_s$  = tegangan yang terukur (Volt),

$I_s$  = arus yang terukur (Ampere),

$R_s$  = hambatan shunt (Ohm).

Karena hambatan shunt dipasang paralel dengan amperemeter, amperemeter akan mengukur arus yang mengalir melalui shunt tersebut. Persamaan hubungan antara arus total dan arus yang diukur oleh amperemeter (dengan hambatan shunt) adalah:

$$r_s = \frac{R}{n - 1}$$

dengan:

$r$  = hambatan dalam amperemeter ( $\Omega$ ),

$r_s$  = hambatan shunt ( $\Omega$ ),

$n$  = faktor pengali arus yang ingin diukur,

$I_s$  = arus yang diukur (Ampere),

$I$  = arus yang melalui amperemeter (Ampere).

### Voltmeter

Voltmeter digunakan untuk mengukur beda potensial atau tegangan antara dua titik dalam rangkaian. Voltmeter ideal memiliki hambatan dalam yang sangat besar, sehingga tidak mempengaruhi arus dalam rangkaian yang sedang diukur. Voltmeter dipasang secara paralel dengan komponen yang ingin diukur tegangan listriknya.

Untuk menghitung tegangan dalam rangkaian yang menggunakan voltmeter, persamaan yang berlaku adalah:

$$V = V_d + V_s$$

dengan:

$V_d$  = tegangan yang terukur pada voltmeter (Volt),

$V_s$  = tegangan yang ingin diukur (Volt).

Jika voltmeter dipasang dengan hambatan pembagi tegangan, tegangan yang diukur akan dipengaruhi oleh hambatan tersebut. Persamaan untuk voltmeter yang dipasang dengan hambatan pembagi tegangan adalah:

$$V_d = V \left( \frac{R_s}{R_s + R} \right)$$

dengan:

$V$  = tegangan total (Volt),

$R_s$  = hambatan pembagi tegangan (Ohm),

$R$  = hambatan pada rangkaian yang akan diukur (Ohm).

### Ohmmeter

Ohmmeter adalah alat yang digunakan untuk mengukur hambatan listrik secara langsung. Ohmmeter mengukur hambatan dengan cara mengalirkan arus melalui komponen yang ingin diukur hambatannya dan mengukur tegangan yang terjadi. Alat ini berfungsi untuk mengetahui nilai hambatan dalam rangkaian atau komponen.

Rumus yang digunakan dalam pengukuran menggunakan ohmmeter adalah berdasarkan hukum Ohm:

$$R = \frac{V}{I}$$

dengan:

$R$  = hambatan (Ohm),

$V$  = tegangan (Volt),

$I$  = arus yang mengalir (Ampere).

Ohmmeter dapat menggunakan rangkaian Wheatstone Bridge untuk pengukuran yang lebih akurat. Persamaan yang berlaku pada rangkaian tersebut adalah:

$$R_3 = R_1 \times \frac{R_4}{R_2}$$

dengan:

$R_1, R_2, R_3, R_4$  adalah hambatan yang terhubung dalam rangkaian jembatan Wheatstone.

### Contoh Soal

Amperemeter digunakan untuk mengukur kuat arus listrik dalam rangkaian. Namun, pada amperemeter nyata, hambatan dalam ( $r$ ) tidak nol, sehingga arus yang mengalir dalam rangkaian bisa terpengaruh oleh hambatan tersebut. Jelaskan bagaimana hambatan shunt ( $R_s$ ) digunakan untuk mengatasi masalah ini dalam amperemeter dan apa hubungan antara hambatan dalam amperemeter, hambatan shunt, dan arus yang terukur!

### Pembahasan:

Pada amperemeter yang dipasang dengan hambatan shunt secara paralel, hambatan shunt digunakan untuk mengalihkan sebagian arus melalui shunt, sehingga amperemeter hanya mengukur arus yang mengalir melalui shunt tersebut. Hal ini memungkinkan pengukuran arus yang lebih besar tanpa

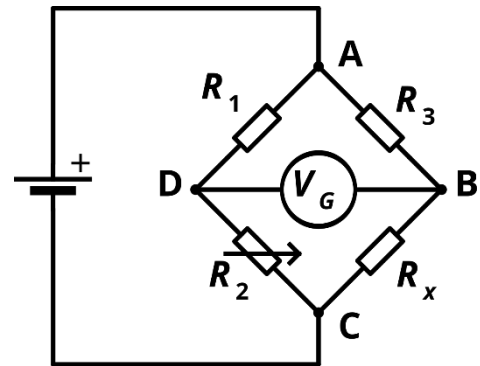


Diagram rangkaian jembatan Wheatstone –  
Wikipedia.org

mempengaruhi total arus dalam rangkaian. Hubungan antara hambatan dalam amperemeter ( $r$ ), hambatan shunt ( $R_s$ ), dan faktor pengali arus dapat dijelaskan dengan persamaan:

$$r_s = \frac{R}{n - 1}$$

Di mana  $n$  adalah faktor pengali arus yang ingin diukur, dan  $R$  adalah hambatan dalam amperemeter. Dengan menggunakan hambatan shunt, arus yang terukur akan lebih akurat dan sesuai dengan arus yang mengalir di rangkaian tanpa mempengaruhi pengukuran.

## Kegiatan Kelompok

### Mengukur Hambatan dengan Jembatan Wheatstone

**Tujuan:** Menentukan besar hambatan listrik pada sebuah resistor menggunakan metode jembatan Wheatstone.

#### Alat dan Bahan

- 1) Sumber tegangan (baterai)
- 2) Resistor yang tidak diketahui nilainya ( $R_x$ )
- 3) Papan rangkaian Wheatstone
- 4) Resistor pembanding ( $R$ )
- 5) Rheostat
- 6) Galvanometer
- 7) Kabel penghubung

#### Langkah Kerja

- 1) Bentuk kelompok berisi 4–5 orang.
- 2) Rangkai alat sesuai skema jembatan Wheatstone.
- 3) Atur rheostat sampai jarum galvanometer tidak bergerak (nol).
- 4) Catat panjang kawat pada sisi kiri ( $l_1$ ) dan sisi kanan ( $l_2$ ).
- 5) Hitung nilai hambatan tak diketahui ( $R_x$ ) dengan rumus:  $R_x = R \times \frac{l_2}{l_1}$
- 6) Ulangi percobaan dengan nilai resistor pembanding ( $R$ ) yang berbeda.

**Tabel Pengamatan**

No	Nilai Resistor Pembanding ( $R$ )	Panjang ( $l_1$ ) (cm)	Panjang ( $l_2$ ) (cm)	Hambatan Tak Diketahui ( $R_x$ ) ( $\Omega$ )
1				
2				
3				
4				

#### Pertanyaan Diskusi

- 1) Bagaimana hubungan perubahan nilai resistor pembanding ( $R$ ) terhadap hasil perhitungan ( $R_x$ )?
- 2) Mengapa galvanometer harus menunjukkan angka nol saat kondisi seimbang?
- 3) Apa keuntungan menggunakan metode jembatan Wheatstone dibanding cara langsung mengukur dengan ohmmeter?

## Rangkuman

### 1) Konsep Gerak

Kinematika mempelajari gerakan benda tanpa membahas penyebabnya. Benda dikatakan bergerak jika posisinya berubah terhadap titik acuan dalam waktu tertentu. Besaran penting dalam gerak meliputi jarak (skalar), perpindahan (vektor), kelajuan (tanpa arah), kecepatan (berarah), dan percepatan (perubahan kecepatan per waktu). Tiga rumus penting dalam konsep dasar ini adalah:

$$\text{Kelajuan} = \frac{\text{Jarak}}{\text{Waktu}}$$

$$\text{Kecepatan} = \frac{\text{Perpindahan}}{\text{Waktu}}$$

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}$$

### 2) Gerak Lurus Beraturan

Gerak lurus beraturan (GLB) adalah gerak benda pada lintasan lurus dengan kecepatan tetap, sehingga besar perpindahan selalu sama pada setiap interval waktu. Dalam grafik  $v-t$ , gerak ini berbentuk garis horizontal, dan grafik  $s-t$  berupa garis lurus bergradien tetap. Gradien grafik menyatakan kecepatan. Beberapa rumus penting untuk GLB adalah:

$$v = \frac{s}{t}$$

$$\tan \theta = \frac{s}{t} = v$$

$$s = s_0 + vt$$

### 3) Gerak Lurus Berubah Beraturan

Gerak lurus berubah beraturan (GLBB) terjadi ketika benda mengalami percepatan tetap, sehingga kecepatannya berubah secara teratur. Jika kecepatannya meningkat, disebut dipercepat; jika menurun, disebut diperlambat. Perubahan ini dinyatakan dalam rumus-rumus berikut:

$$v_t = v_0 + at$$

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

$$v_t^2 = v_0^2 + 2as$$

### 4) Gerak Jatuh Bebas

Gerak jatuh bebas adalah gerak benda yang dijatuhkan tanpa kecepatan awal, sehingga hanya dipengaruhi oleh percepatan gravitasi. Gerak ini termasuk GLBB dipercepat. Kecepatan benda bertambah seiring waktu dan mengikuti rumus-rumus berikut:

$$v_t = gt$$

$$y = \frac{1}{2} gt^2$$

$$v_t^2 = 2gy$$

### 5) Gerak Parabola

Gerak parabola adalah gabungan GLB pada sumbu X dan GLBB pada sumbu Y, terjadi ketika benda dilempar dengan sudut terhadap arah horizontal. Gerakan ini membentuk lintasan melengkung simetris.

Komponen kecepatan horizontal tetap, sedangkan komponen vertikal berubah karena gravitasi. Rumus penting dalam gerak parabola meliputi:

$$x = v_0 \cos \alpha \cdot t$$

$$y = v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{1}{2}gt^2$$

$$x_{\text{maks}} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$$

#### 6) Gerak Melingkar Beraturan

Gerak melingkar beraturan (GMB) terjadi saat benda bergerak di lintasan lingkaran dengan kelajuan tetap. Meskipun besar kecepatannya konstan, arah kecepatan terus berubah, menghasilkan percepatan sentripetal yang mengarah ke pusat lingkaran. Besaran-besaran penting dalam GMB meliputi frekuensi, kecepatan sudut, kelajuan linear, dan percepatan sentripetal, dengan rumus:

$$\omega = 2\pi f$$

$$v = \omega r$$

$$a_s = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$$

### Latihan Soal

1. Sebuah mobil bergerak lurus dengan kecepatan tetap 20 m/s selama 8 sekon. Jarak yang ditempuh mobil selama waktu tersebut adalah ...
  - A. 80 m
  - B. 120 m
  - C. 140 m
  - D. 160 m
  - E. 180 m
2. Sebuah benda mula-mula diam, kemudian dipercepat secara tetap sehingga dalam waktu 4 sekon kecepatannya menjadi 16 m/s. Besar percepatan yang dialami benda adalah ...
  - A.  $2 \text{ m/s}^2$
  - B.  $3 \text{ m/s}^2$
  - C.  $4 \text{ m/s}^2$
  - D.  $5 \text{ m/s}^2$
  - E.  $6 \text{ m/s}^2$
3. Sebuah benda dijatuhkan dari ketinggian 80 meter tanpa kecepatan awal. Jika percepatan gravitasi  $10 \text{ m/s}^2$ , waktu yang dibutuhkan benda untuk mencapai tanah adalah ...
  - A. 2 s
  - B. 3 s
  - C. 4 s
  - D. 5 s
  - E. 6 s
4. Mobil A dan mobil B bergerak saling mendekat dengan kecepatan masing-masing 60 km/jam dan 90 km/jam. Jika jarak awal mereka 450 km, waktu yang diperlukan agar mereka bertemu adalah ...
  - A. 2 jam
  - B. 3 jam
  - C. 4 jam
  - D. 5 jam
  - E. 6 jam
5. Sebuah benda dilempar vertikal ke atas dengan kecepatan awal 20 m/s. Jika percepatan gravitasi  $10 \text{ m/s}^2$ , maka ketinggian maksimum yang dapat dicapai benda adalah ...
  - A. 10 m
  - B. 15 m
  - C. 20 m
  - D. 30 m
  - E. 40 m

6. Dalam waktu 3 detik, sebuah benda menempuh jarak 18 meter dari keadaan diam. Maka besar percepatan benda tersebut adalah ...
- A.  $2 \text{ m/s}^2$
  - B.  $3 \text{ m/s}^2$
  - C.  $4 \text{ m/s}^2$
  - D.  $5 \text{ m/s}^2$
  - E.  $6 \text{ m/s}^2$
7. Perahu mula-mula bergerak dengan kecepatan tetap 10 m/s. Kemudian dalam waktu 5 detik, kecepatannya turun menjadi 0 karena mesin dimatikan. Percepatan yang dialami perahu selama melambat adalah ...
- A.  $-1 \text{ m/s}^2$
  - B.  $-2 \text{ m/s}^2$
  - C.  $-3 \text{ m/s}^2$
  - D.  $-4 \text{ m/s}^2$
  - E.  $-5 \text{ m/s}^2$

Akses latihan soal  
lainnya di sini yuk!



Latihan Soal Fisika  
Kelas 12 BAB 2



## Referensi

Giancoli, D. C. (2005). Physics: Principles with applications (6th ed.). Pearson Education.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2014). Physics for scientists and engineers with modern physics (9th ed.). Brooks Cole.

Suparno, P. (2008). Konsep dasar fisika 1: Mekanika dan termodinamika. Universitas Sanata Dharma Press.

Sutrisno, H. (2020). Fisika SMA/MA kelas X kurikulum Merdeka. Yrama Widya.

Yulianti, N., & Widodo, S. (2021). Fisika untuk SMA/MA kelas X kurikulum 2013 revisi 2017. Pusat Kurikulum dan Perbukuan, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan.

University of Colorado Boulder. (2024). PhET interactive simulations. <https://phet.colorado.edu/>



# BAB 3: MEDAN MAGNETIK

## Karakter Pelajar Pancasila

Bergotong-royong, Kreatif, Bernalar Kritis

**Kata Kunci:** Gaya Lorentz, Hukum Biot-Savart, Induksi Magnetik, Medan Magnetik, Solenoid, Toroid.

**Tujuan Pembelajaran: Memahami Fenomena Magnetik, Prinsip-prinsip Medan Magnetik, dan Aplikasinya dalam Teknologi serta Eksperimen Ilmiah**

### 1. Mengidentifikasi Fenomena Magnetik dalam Kehidupan Sehari-hari

- ▷ Mengenali kejadian-kejadian umum di mana gaya magnet dapat diamati, seperti penggunaan magnet pada benda-benda rumah tangga atau teknologi.
- ▷ Memahami bagaimana medan magnet berinteraksi dengan berbagai bahan di sekitar kita, mulai dari kompas hingga peralatan elektronik.

### 2. Mendeskripsikan Medan Magnetik dalam Berbagai Fenomena dan Gaya Magnetik

- ▷ Membahas peran gaya Lorentz dalam menghasilkan medan magnet dan dampaknya terhadap muatan yang bergerak.
- ▷ Mengeksplorasi bagaimana berbagai faktor, seperti jenis material dan kekuatan medan magnet, memengaruhi perilaku gaya ini.

### **3. Menganalisis Medan Magnetik, Induksi Magnetik, dan Gaya Magnetik pada Berbagai Produk Teknologi**

- ▷ Meneliti penerapan medan magnet dan induksi dalam berbagai teknologi seperti motor listrik, generator, dan transformator.
- ▷ Memahami prinsip-prinsip elektromagnetisme dan penerapannya dalam perangkat sehari-hari seperti speaker dan mesin MRI.

### **4. Merencanakan dan Melakukan Eksperimen tentang Medan Magnetik dan Gaya Magnetik pada Konduktor dan Sistem Komunikasi**

- ▷ Mengembangkan eksperimen praktis untuk mengamati dan mengukur medan magnet dan gaya yang muncul di sekitar konduktor yang dialiri arus.
- ▷ Mengkomunikasikan hasil eksperimen dengan efektif, menggunakan metode dan bahasa ilmiah yang tepat.



**F I T R I**



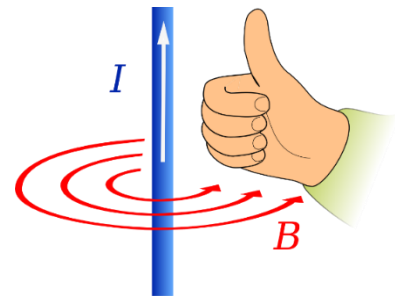
## 1. Medan Magnetik di Sekitar Arus Listrik

Medan magnet adalah daerah di sekitar penghantar berarus listrik yang dapat menghasilkan gaya magnetik. Fenomena ini pertama kali diteliti oleh Hans Christian Oersted pada tahun 1820. Ia menemukan bahwa jarum kompas yang didekatkan pada kawat berarus listrik akan menyimpang dari arah utara-selatan. Penemuan ini membuktikan bahwa arus listrik dapat menimbulkan medan magnet.

Dalam percobaannya, Oersted menggunakan jarum magnet kecil dan kawat penghantar yang dialiri arus. Ketika arus listrik mengalir, posisi jarum magnet berubah, menandakan adanya medan magnet di sekitar kawat. Arah penyimpangan jarum bergantung pada arah arus listrik. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa arus listrik dapat menghasilkan medan magnet di sekitarnya. Garis-garis gaya medan magnet ini digambarkan berbentuk lingkaran yang mengelilingi kawat penghantar.

Terdapat dua aturan yang digunakan untuk menentukan arah medan magnet:

- Aturan sekrup tangan kanan: arah putaran sekrup menunjukkan arah medan magnet, sedangkan gerakan maju sekrup menunjukkan arah arus listrik.
- Aturan tangan kanan: jika ibu jari menunjukkan arah arus listrik, maka arah lengkungan keempat jari menunjukkan arah medan magnet.



Aturan tangan kanan – id.wikipedia.org

### Hukum Biot-Savart

Hukum Biot-Savart menjelaskan hubungan antara arus listrik dengan medan magnet yang ditimbulkannya. Besarnya medan magnet di titik A akibat elemen kawat penghantar yang dialiri arus listrik dinyatakan sebagai:

$$dB = \frac{\mu_0 I dL \sin \theta}{4\pi r^2}$$

dengan:

$dB$  = induksi magnetik di titik A (Tesla),

$dL$  = panjang elemen kawat (m),

$I$  = kuat arus listrik (A),

$r$  = jarak dari kawat ke titik A (m),

$\mu_0$  = permeabilitas vakum ( $4\pi \times 10^{-7} \text{Wb/A}\cdot\text{m}$ ).

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa besarnya medan magnet berbanding lurus dengan kuat arus listrik dan panjang penghantar, serta berbanding terbalik dengan kuadrat jarak dari kawat.

### Medan Magnet di Sekitar Kawat Lurus Panjang

Untuk kawat panjang yang dialiri arus listrik, persamaan Biot-Savart dapat diintegrasikan sehingga diperoleh:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

dengan:

$B$  = induksi magnetik (Tesla),

$I$  = kuat arus listrik (A),

$a$  = jarak dari titik ke kawat (m).

Persamaan ini menunjukkan bahwa semakin dekat titik pengamatan ke kawat, semakin besar medan magnet yang dirasakan.

### Medan Magnet pada Kawat Melingkar

Jika kawat penghantar dibentuk menjadi lingkaran dengan jari-jari ( $a$ ), medan magnet di pusat lingkaran adalah:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2a}$$

Jika lilitan terdiri dari ( $N$ ) putaran, maka:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2a}$$

dengan:

$N$  = jumlah lilitan,

$I$  = arus listrik (A),

$a$  = jari-jari lingkaran (m).

### Medan Magnet di Sekitar Solenoida

Solenoida adalah kawat penghantar panjang yang dililit rapat membentuk kumparan. Medan magnet di dalam solenoida sebanding dengan jumlah lilitan dan arus listrik, serta berbanding terbalik dengan panjang solenoida. Persamaannya:

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I$$

dengan:

$B$  = induksi magnetik di tengah solenoida (Tesla),

$N$  = jumlah lilitan,

$I$  = arus listrik (A),

$L$  = panjang solenoida (m).

Di ujung solenoida, besar induksi magnetiknya adalah:

$$B_u = \frac{\mu_0 NI}{2L}$$

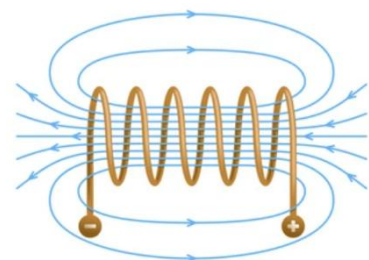
### Medan Magnet pada Toroida

Toroida adalah solenoida yang dibentuk melingkar seperti cincin. Medan magnet di dalam toroid dapat ditentukan dengan hukum Ampere. Persamaannya adalah:

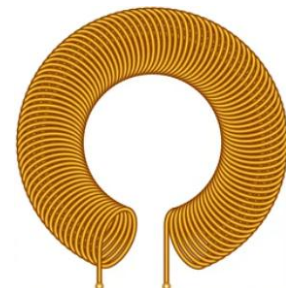
$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi a}$$

dengan:

$B$  = induksi magnetik pada toroid (Tesla),



Kumparan solenoid –  
Shutterstock.com.1971790514



Kumparan Toroida –  
Shutterstock.com. 2294782019



$N$  = jumlah lilitan,

$I$  = arus listrik (A),

$a$  = jari-jari toroid (m).

### Contoh Soal

Sebuah kawat lurus dialiri arus listrik sebesar 5 A. Tentukan besar medan magnetik yang dihasilkan pada jarak 10 cm dari kawat tersebut!

#### Pembahasan:

Untuk menghitung medan magnetik di sekitar kawat lurus, kita menggunakan rumus Hukum Biot-Savart:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r}$$

Dimana:

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$  adalah permeabilitas vakum,

$I = 5 \text{ A}$  adalah kuat arus listrik,

$r = 10 \text{ cm} = 0.1 \text{ m}$  adalah jarak dari kawat.

Maka, besar medan magnetik yang dihasilkan adalah:

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \cdot 5}{2\pi \cdot 0.1} = \frac{2 \times 10^{-6}}{0.2} = 1 \times 10^{-5} \text{ T}$$

Jadi, besar medan magnetik yang dihasilkan pada jarak 10 cm dari kawat tersebut adalah  $1 \times 10^{-5} \text{ T}$ .



### Fakta Fisika di Sekitarmu



Kompas – Shutterstock.com.2085247075

Tahukah kamu bahwa medan magnet Bumi yang kita alami sehari-hari adalah hasil dari pergerakan logam cair di inti Bumi? Proses ini menciptakan medan magnet yang melindungi Bumi dari radiasi berbahaya dari luar angkasa. Itu sebabnya kita selalu memiliki kompas yang berfungsi dengan baik!



## 2. Magnetik (Gaya Lorentz)

Gaya Lorentz merupakan gaya yang bekerja pada partikel bermuatan yang bergerak dalam medan magnet. Gaya ini terjadi karena interaksi antara arus listrik yang mengalir melalui penghantar dan medan magnet yang ada di sekitarnya. Dalam fisika, gaya Lorentz digunakan untuk menjelaskan banyak fenomena seperti pada motor listrik atau partikel yang bergerak dalam medan magnet.

Rumus Gaya Lorentz:

$$F = ILB \sin \theta$$

dengan:

$F$  = gaya Lorentz (N),

$I$  = kuat arus listrik (A),

$L$  = panjang kawat (m),

$B$  = induksi magnetik (T),

$\theta$  = sudut antara arah arus listrik dengan medan magnet.

### Gaya Lorentz pada Kawat Lurus Berarus Listrik

Ketika arus listrik mengalir pada kawat lurus yang diletakkan dalam medan magnet, gaya Lorentz akan bekerja pada kawat tersebut. Gaya ini berbanding lurus dengan kuat arus, panjang kawat, dan besar induksi magnet yang ada di sekitar kawat.

Rumus untuk menghitung gaya Lorentz pada kawat lurus:

$$F = ILB$$

dengan:

$I$  = kuat arus listrik (A),

$L$  = panjang kawat (m),

$B$  = induksi magnetik (T),

$\theta$  = sudut antara arah arus dan arah medan magnet.

### Gaya Lorentz pada Kawat Sejajar Berarus Listrik

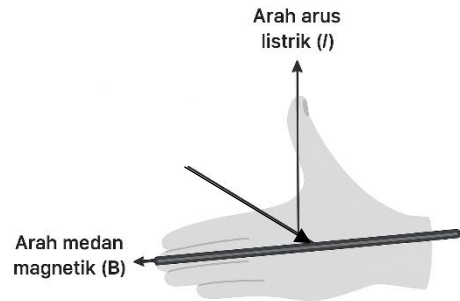
Pada dua kawat sejajar yang dialiri arus listrik, medan magnet yang dihasilkan oleh satu kawat akan mempengaruhi kawat lainnya. Jika kedua arus searah, maka gaya yang terjadi akan bersifat tarik-menarik, sementara jika arus berlawanan arah, gaya yang timbul adalah tolak-menolak.

Induksi Magnetik pada Kawat Sejajar:

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi L_2}$$

dengan:

$B_2$  = induksi magnetik yang disebabkan oleh kawat kedua,



*Konsep aturan tangan kanan dalam menentukan gaya lorentz – Shutterstock.com*



$I_2$  = arus pada kawat kedua (A),

$L_2$  = jarak antara kedua kawat (m),

$\mu_0$  = permeabilitas vakum.

### Gaya Lorentz pada Partikel Bermuatan Bergerak

Partikel bermuatan yang bergerak dalam medan magnet juga mengalami gaya Lorentz. Gaya ini berbanding lurus dengan besar muatan, kecepatan partikel, dan besar medan magnet yang bekerja. Gaya yang bekerja pada partikel bermuatan dapat dihitung dengan rumus:

$$F = qvB \sin \theta$$

dengan:

F = gaya Lorentz (N),

q = muatan partikel (C),

v = kecepatan partikel (m/s),

B = induksi magnetik (T),

$\theta$  = sudut antara arah kecepatan partikel dengan medan magnet.

Pada partikel yang bergerak melingkar, gaya Lorentz menyebabkan partikel bergerak sepanjang lintasan melingkar dengan radius tertentu.

Rumus untuk mencari massa partikel bergerak dalam medan magnet:

$$m = \frac{qBr}{v}$$

dengan:

m = massa partikel (kg),

r = jari-jari lintasan partikel (m),

v = kecepatan partikel (m/s),

q = muatan partikel (C),

B = induksi magnetik (T).

### Contoh Soal

Sebuah kawat lurus sepanjang 0,5 m dialiri arus listrik sebesar 3 A. Tentukan besar gaya Lorentz yang bekerja pada kawat tersebut jika kawat diletakkan pada medan magnet sebesar 2 T dengan sudut  $90^\circ$  terhadap arah arus!

#### Pembahasan:

Untuk menghitung gaya Lorentz pada kawat lurus, kita menggunakan rumus:

$$F = ILB \sin \theta$$

Dimana:

I = 3 A (kuat arus),

$L = 0,5 \text{ m}$  (panjang kawat),

$B = 2 \text{ T}$  (induksi magnetik),

$\theta = 90^\circ$  (sudut antara arah arus dan medan magnet).

Karena sudut ( $\theta = 90^\circ$ ), maka ( $\sin 90^\circ = 1$ ).

Maka, besar gaya Lorentz adalah:

$$F = 3 \cdot 0,5 \cdot 2 \cdot 1 = 3 \text{ N}$$

Jadi, besar gaya Lorentz yang bekerja pada kawat tersebut adalah 3 N.

## Kegiatan Kelompok

### Menganalisis Pengaruh Arus Listrik terhadap Medan Magnetik

**Tujuan:** Memahami bagaimana arus listrik dapat menghasilkan medan magnet serta faktor-faktor yang memengaruhi besar dan arah medan magnet di sekitar kawat berarus listrik.

#### Alat dan Bahan:

- 1) Jarum magnet/kompas kecil (lebih dari 1, misalnya 3–5 buah)
- 2) Baterai beberapa buah ( $\geq 5$  buah)
- 3) Sakelar
- 4) Kabel penjepit buaya 2 buah
- 5) Kawat tembaga lurus ( $\pm 50 \text{ cm}$ )
- 6) Statif dan klem (sebagai penyangga kawat)

#### Cara Kerja:

- 1) Bentuk kelompok berisi 3–4 siswa.
- 2) Rangkai alat dan bahan seperti pada gambar skema percobaan medan magnet di sekitar kawat lurus berarus.
- 3) Letakkan jarum-jarum magnet di sekitar kawat sebelum arus dinyalakan, lalu catat arah jarum magnet (utara–selatan).
- 4) Alirkan arus listrik dengan menutup sakelar, amati perubahan arah jarum magnet.
- 5) Variasikan kuat arus listrik dengan menambah jumlah baterai, lalu amati penyimpangan jarum magnet.
- 6) Ubah arah arus listrik dengan menukar kutub baterai, lalu amati perubahan arah simpangan jarum magnet.
- 7) Catat semua hasil pengamatan dalam tabel.

#### Pertanyaan Analisis:

- 1) Faktor apa saja yang memengaruhi kuat dan arah medan magnet di sekitar kawat berarus listrik?
- 2) Bagaimana hubungan arah arus dengan arah medan magnet berdasarkan aturan tangan kanan?
- 3) Buat laporan ilmiah dengan format sistematis (tujuan, alat dan bahan, langkah kerja, hasil, pembahasan, dan kesimpulan).

## Rangkuman

### 1) Medan Magnetik di Sekitar Arus Listrik

Medan magnet adalah daerah di sekitar kawat penghantar berarus listrik yang dapat menghasilkan gaya magnet. Arah medan magnet dapat ditentukan dengan menggunakan aturan putaran sekrup dan aturan tangan kanan.

Berikut adalah rumus-rumus untuk menghitung induksi magnetik pada berbagai jenis kawat:

- a. Induksi Magnetik pada Kawat Lurus Berarus Listrik:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

- b. Induksi Magnetik pada Kawat Melingkar Berarus Listrik:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2a}$$

- c. Induksi Magnetik pada Solenoid:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L}$$

- d. Induksi Magnetik pada Toroid:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi a}$$

### 2) Gaya Magnetik (Gaya Lorentz)

Gaya Lorentz adalah gaya yang bekerja pada kawat berarus listrik atau partikel bermuatan yang bergerak dalam medan magnet. Gaya Lorentz pada kawat lurus berarus listrik dan partikel bermuatan dapat dihitung dengan rumus:

- a. Gaya Lorentz pada Kawat Lurus Berarus Listrik:

$$F = ILB \sin \theta$$

- b. Gaya Lorentz pada Kawat Lurus Sejajar Berarus Listrik:

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi r}$$

- c. Gaya Lorentz pada Partikel Bermuatan Bergerak:

$$F = qvB \sin \theta$$

### Latihan Soal

1. Sebuah kawat lurus sepanjang 1 m dialiri arus listrik 3 A. Hitung besar gaya Lorentz yang bekerja pada kawat tersebut jika kawat diletakkan dalam medan magnet sebesar 2 T dengan sudut  $90^\circ$  terhadap arah arus listrik!  
A. 3 N  
B. 2 N  
C. 6 N  
D. 4 N  
E. 1 N
2. Dua kawat sejajar yang masing-masing dialiri arus listrik sebesar  $I_1 = 4$  A dan  $I_2 = 3$  A dipasang pada jarak 0,2 m. Tentukan besar gaya yang bekerja pada kawat pertama akibat kawat kedua jika induksi magnetik pada kawat pertama disebabkan oleh arus pada kawat kedua!  
A.  $2,4 \times 10^{-5}$  N  
B.  $3,0 \times 10^{-5}$  N  
C.  $4,5 \times 10^{-5}$  N  
D.  $5,0 \times 10^{-5}$  N  
E.  $6,2 \times 10^{-5}$  N
3. Sebuah solenoid panjang 0,5 m dengan jumlah lilitan 1000 dan dialiri arus listrik sebesar 5 A. Tentukan besar induksi magnetik di dalam solenoid!  
A.  $1,26 \times 10^{-2}$  T  
B.  $1,56 \times 10^{-2}$  T  
C.  $2,36 \times 10^{-2}$  T  
D.  $3,26 \times 10^{-2}$  T  
E.  $4,16 \times 10^{-2}$  T
4. Jelaskan bagaimana prinsip gaya Lorentz digunakan dalam motor listrik dan mengapa pentingnya konsep medan magnet dalam pengoperasian motor listrik!  
A. Gaya Lorentz digunakan untuk menggerakkan komponen motor tanpa arus listrik  
B. Medan magnet diperlukan untuk menghasilkan gaya yang menggerakkan rotor dalam motor  
C. Gaya Lorentz hanya bekerja pada kawat yang tidak dialiri arus  
D. Medan magnet tidak ada kaitannya dengan pengoperasian motor listrik  
E. Motor listrik hanya berfungsi di ruang hampa udara
5. Bagaimana perbedaan gaya Lorentz pada partikel bermuatan yang bergerak dalam medan magnet dengan gaya Lorentz yang bekerja pada kawat yang dialiri arus listrik? Jelaskan perbedaan tersebut dari segi konsep dan aplikasinya!  
A. Gaya Lorentz pada partikel bermuatan lebih besar daripada gaya pada kawat  
B. Pada kawat, gaya Lorentz tidak bergantung pada arah medan magnet

- C. Gaya pada kawat menghasilkan gerakan linear, sedangkan gaya pada partikel mengarah ke pusat
- D. Gaya pada partikel bermuatan bekerja pada lintasan melingkar, sementara gaya pada kawat bekerja linear
- E. Keduanya bekerja dengan cara yang sama, hanya berbeda pada bentuknya
6. Sebuah partikel bermuatan  $q = 2 \times 10^{-6}\text{C}$  bergerak dengan kecepatan  $v = 4 \times 10^6\text{m/s}$  dalam medan magnet sebesar 0,3 T dengan sudut  $90^\circ$ . Hitung besar gaya Lorentz yang dialami oleh partikel tersebut!
- A. 2 N
- B. 3 N
- C. 4 N
- D. 5 N
- E. 6 N
7. Jika sebuah kawat solenoid sangat panjang dan dialiri arus listrik sebesar 2 A, dengan jumlah lilitan 1000 dan panjang solenoid 0,6 m, tentukan induksi magnetik di dalam solenoid tersebut!
- A.  $1,26 \times 10^{-2}\text{ T}$
- B.  $2,36 \times 10^{-2}\text{ T}$
- C.  $3,46 \times 10^{-2}\text{ T}$
- D.  $4,56 \times 10^{-2}\text{ T}$
- E.  $5,66 \times 10^{-2}\text{ T}$

Akses latihan soal  
lainnya di sini yuk!



Latihan Soal Fisika  
Kelas 12 BAB 3

## Referensi

Griffiths, D. J. (2017). *Introduction to Electrodynamics* (4th ed.). Pearson Education.

Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2014). *Fundamentals of Physics* (10th ed.). John Wiley & Sons.

Purcell, E. M. (2013). *Electricity and Magnetism* (3rd ed.). Cambridge University Press.

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2007). *Physics for Scientists and Engineers* (6th ed.). W. H. Freeman and Company.

Oersted, H. C. (1820). *Experiment on the Effect of Electric Currents on the Magnetic Needle*. Philosophical Magazine, 36(2), 1-4.





# BAB 4: PRINSIP INDUKSI ELEKTROMAGNETIK DAN SISTEM

## Karakter Pelajar Pancasila

Bergotong royong, Bernalar kritis, Kreatif, dan Mandiri

**Kata Kunci:** Alternator, Fluks magnetik, Generator, GGL induksi, Impedansi, Induktansi diri, Hukum Faraday, Hukum Lenz, Rangkaian RLC, Transformator.

## Tujuan Pembelajaran: Memahami Induksi Elektromagnetik dan Rangkaian AC

### 1. Mendeskripsikan Fluks Magnetik dan Gaya Gerak Listrik

- ▷ Mendeskripsikan konsep fluks magnetik yang menembus suatu bidang permukaan.
- ▷ Menganalisis hubungan fluks magnetik dengan gaya gerak listrik (GGL).

### 2. Menganalisis Arah Arus Induksi

- ▷ Menganalisis arah arus listrik dalam kumparan akibat perubahan medan magnet.
- ▷ Menjelaskan keterkaitan arah arus induksi dengan hukum Faraday dan hukum Lenz.

### 3. Menjelaskan Prinsip Kerja Generator

- ▷ Menjelaskan prinsip kerja generator arus bolak-balik (AC).
- ▷ Menjelaskan prinsip kerja generator arus searah (DC).

#### **4. Menganalisis GGL Induksi pada Kumparan**

- ▷ Menganalisis timbulnya GGL induksi pada kumparan akibat arus bolak-balik.
- ▷ Mendeskripsikan proses terjadinya tegangan induksi karena perubahan arus AC.

#### **5. Mengidentifikasi Karakteristik Arus dan Tegangan**

- ▷ Mengidentifikasi sifat arus dan tegangan pada resistor, induktor, dan kapasitor.
- ▷ Menghubungkan karakteristik komponen listrik dengan arus bolak-balik.

#### **6. Menganalisis Fenomena Rangkaian Arus Bolak-Balik**

- ▷ Menganalisis prinsip kerja rangkaian listrik bolak-balik secara teoritis.
- ▷ Menganalisis penerapan rangkaian bolak-balik dalam kehidupan sehari-hari.

#### **7. Melakukan Percobaan Induksi Elektromagnetik**

- ▷ Melakukan percobaan sederhana tentang induksi elektromagnetik dan arus bolak-balik.
- ▷ Mempresentasikan hasil percobaan rangkaian arus bolak-balik secara lisan atau tertulis.



**F I T R I**





## 1. Fluks Magnet

Sebelumnya kita sudah mengetahui bahwa Hans Christian Oersted menemukan bahwa arus listrik dapat menimbulkan medan magnet. Pertanyaannya, apakah sebaliknya medan magnet juga bisa menghasilkan arus listrik? Pertanyaan ini kemudian diteliti oleh Michael Faraday (1771–1871), seorang fisikawan asal Inggris. Faraday menggunakan kumparan, magnet batang, dan galvanometer untuk menguji apakah perubahan medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Namun sebelum membahas lebih jauh, kita perlu memahami konsep fluks magnetik. Apa itu fluks magnetik? Mengapa pembahasan mengenai fluks magnetik penting sebagai dasar mempelajari induksi elektromagnetik?

Michael Faraday menggambarkan medan magnet sebagai garis-garis gaya magnet. Jumlah garis gaya magnet yang menembus suatu bidang permukaan dengan luas tertentu dinamakan fluks magnetik ( $\Phi$ ). Pada medan magnet homogen, besar fluks magnetik didefinisikan sebagai hasil kali antara induksi magnetik dengan luas bidang yang tegak lurus terhadap arah medan magnet tersebut.

Secara matematis, fluks magnetik dirumuskan sebagai berikut:

$$\Phi = \int B \cdot dA$$

Jika sudut antara arah medan magnet  $B$  dengan bidang permukaan  $dA$  konstan, persamaan dapat ditulis menjadi:

$$\Phi = \int B, dA, \cos \theta$$

Untuk kondisi tertentu, fluks magnetik dapat dituliskan dalam bentuk sederhana:

$$\Phi = BA \cos \theta = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

dengan:

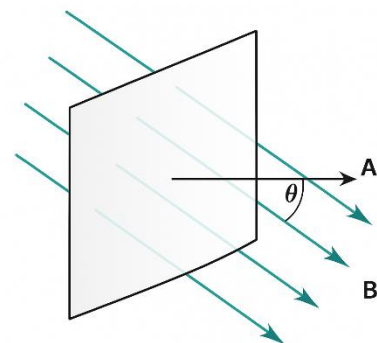
$\Phi$  = fluks magnetik (Weber, Wb)

$B$  = induksi magnetik (Tesla, T)

$A$  = luas bidang ( $m^2$ )

$\theta$  = sudut antara arah medan magnet dengan garis normal bidang ( $^\circ$ ).

Satuan fluks magnetik dalam SI adalah weber (Wb), dengan hubungan  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$ .



*Fluks medan magnet ( $B$ ) merupakan ukuran yang menggambarkan seberapa banyak medan magnet yang melewati suatu area ( $A$ )*

### Contoh Soal

Sebuah bidang kawat berbentuk persegi panjang berukuran  $20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$  diletakkan tegak lurus terhadap medan magnet homogen sebesar  $0,5 \text{ T}$ . Hitung besar fluks magnet yang menembus bidang kawat tersebut.

**Pembahasan:**

Fluks magnet dirumuskan **dengan:**

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos \theta$$

Karena bidang tegak lurus medan magnet, maka  $\theta = 0^\circ$  sehingga  $\cos 0^\circ = 1$ .

$$A = p \times l = 0,20, \text{m} \times 0,30, \text{m} = 0,06, \text{m}^2$$

$$\Phi = 0,5, \text{T} \times 0,06, \text{m}^2 \times 1 = 0,03, \text{Wb}$$

Jadi, fluks magnet yang menembus bidang kawat adalah 0,03 weber.



### Fakta Fisika di Sekitarmu

Fluks magnetik tidak hanya penting dalam eksperimen fisika, tetapi juga digunakan dalam motor listrik yang ada di hampir semua perangkat elektronik rumah tangga. Prinsip induksi elektromagnetik yang ditemukan Faraday memungkinkan arus listrik bergerak, menghasilkan energi mekanik. Jadi, saat menyalakan kipas angin atau blender, fluks magnetik bekerja di balik layar.



*Perubahan energi pada sepeda listrik –  
Shutterstock.com.2274904921*



## 2. Hukum Faraday dan Hukum Lenz

Pernahkah kamu memperhatikan saat bersepeda, bel sepeda bisa berbunyi atau lampu dapat menyala? Energi listrik yang muncul berasal dari energi gerak sepeda. Fenomena ini berkaitan dengan Hukum Faraday dan Hukum Lenz, yang menjelaskan bagaimana perubahan medan magnet dapat menghasilkan arus listrik.

### Hukum Faraday

Induksi elektromagnetik adalah gejala timbulnya arus listrik pada penghantar akibat adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupinya. Peristiwa ini pertama kali ditemukan oleh Michael Faraday. Dalam percobaannya, Faraday menggunakan kumparan, magnet batang, dan galvanometer. Jika magnet tidak digerakkan, jarum galvanometer tetap diam. Tetapi, jika magnet digerakkan mendekati atau menjauhi kumparan, jarum galvanometer menyimpang. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan fluks magnetik menimbulkan gaya gerak listrik (GGL) induksi, yang mengalirkan arus listrik dalam kumparan.

Besar GGL induksi menurut Hukum Faraday sebanding dengan laju perubahan fluks magnetik terhadap waktu, serta bergantung pada jumlah lilitan kawat pada kumparan:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

dengan:

$\varepsilon$  = GGL induksi (volt, V)

N = jumlah lilitan kawat

$\Phi$  = fluks magnetik (Wb)

Tanda negatif pada persamaan menunjukkan arah arus induksi ditentukan oleh Hukum Lenz.

### Aplikasi Hukum Faraday dalam Generator

Salah satu penerapan hukum Faraday adalah pada generator, yaitu alat yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari pembangkit listrik skala besar hingga dinamo pada sepeda. Generator arus bolak-balik (AC) bekerja dengan prinsip kumparan berputar dalam medan magnet homogen. Jika kumparan diputar dengan kecepatan sudut ( $\omega$ ), maka fluks magnetik yang menembus kumparan berubah secara periodik sehingga menghasilkan GGL induksi sinusoidal.

Rumus GGL induksi pada generator AC adalah:

$$\varepsilon = NBA\omega \sin \omega t$$

dengan:

$\varepsilon$  = GGL induksi (V)

N = jumlah lilitan kumparan

B = induksi magnetik (T)

A = luas kumparan ( $m^2$ )

$\omega$  = kecepatan sudut putar kumparan (rad/s)

t = waktu (s).

Besarnya GGL maksimum (amplitudo) generator dinyatakan **dengan:**

$$\varepsilon_m = NBA$$

Sehingga, GGL yang dihasilkan dapat ditulis:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$$

Pada generator arus searah (DC), kumparan juga diputar dalam medan magnet, tetapi menggunakan cincin belah (komutator) sehingga arus yang dihasilkan searah. Dengan demikian, generator AC menghasilkan tegangan sinusoidal, sedangkan generator DC menghasilkan tegangan searah.

## Hukum Lenz

Seperti telah dibahas pada bagian sebelumnya mengenai Hukum Faraday, apabila suatu magnet digerakkan mendekati atau menjauhi rangkaian kawat, maka terjadi perubahan fluks magnetik pada rangkaian tersebut. Perubahan ini akan menimbulkan gaya gerak listrik (GGL) induksi. Arus listrik yang timbul akibat peristiwa ini disebut arus induksi. Arah arus induksi selalu berusaha menentang perubahan fluks magnetik yang menyebabkannya. Prinsip inilah yang dikenal sebagai Hukum Lenz, dirumuskan oleh Heinrich Friedrich Lenz.

Menurut Hukum Lenz, jika sebuah magnet batang digerakkan mendekati kumparan, fluks magnetik yang menembus kumparan bertambah besar sehingga timbul arus listrik induksi yang arahnya menentang perubahan tersebut. Begitu pula, jika magnet dijauhkan, arus induksi yang timbul akan berlawanan arah agar fluks tetap dipertahankan. Dengan kata lain, arus induksi akan berusaha mempertahankan keadaan fluks magnetik yang stabil.

## Aplikasi Hukum Lenz pada Batang Konduktor

Hukum Lenz dapat pula ditinjau melalui contoh kawat penghantar berbentuk persegi panjang PQRS yang berada dalam medan magnet homogen ( $B$ ). Jika batang konduktor AB digerakkan ke kanan dengan kecepatan ( $v$ ), maka fluks magnetik yang dilingkupi kawat PQRS bertambah. Perubahan fluks ini menimbulkan GGL induksi:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Dengan substitusi:

$$\Phi = BA = B \cdot l \cdot s$$

diperoleh:

$$\varepsilon = -B l v$$

dengan ( $l$ ) panjang batang (m), ( $v$ ) kecepatan gerak batang (m/s), dan ( $B$ ) induksi magnet ( $\text{Wb/m}^2$ ).

Selain GGL induksi, batang konduktor AB juga mengalami gaya Lorentz akibat adanya arus listrik induksi. Besar gaya Lorentz dapat dituliskan:

$$F = B I l$$

Arus induksi yang mengalir memenuhi persamaan hukum Ohm:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{Blv}{R}$$

Sehingga gaya Lorentz dapat dituliskan kembali:

$$F = \frac{B^2 l^2 v}{R}$$

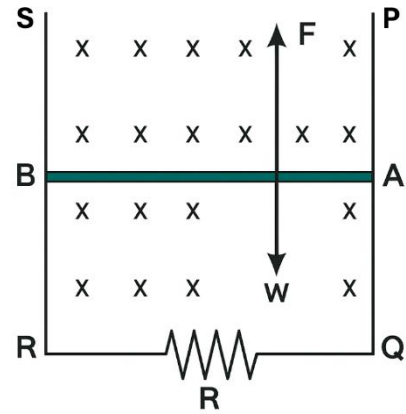
Tanda negatif dalam hukum Lenz menunjukkan bahwa arah gaya ini menentang gerak batang konduktor.

### Kondisi Kecepatan Terminal

Jika kawat PQRS digerakkan vertikal ke bawah, gaya gravitasi akan mempercepat gerak batang AB. Namun, semakin besar kecepatannya, gaya Lorentz yang berlawanan arah dengan gaya gravitasi juga semakin besar. Pada keadaan tertentu, kedua gaya tersebut seimbang, sehingga kecepatan batang mencapai nilai maksimum yang konstan, disebut kecepatan terminal ( $v_t$ ):

$$v_t = \frac{mgR}{B^2 l^2}$$

dengan ( $m$ ) massa batang (kg), ( $g$ ) percepatan gravitasi ( $m/s^2$ ), ( $R$ ) hambatan kawat ( $\Omega$ ), ( $B$ ) induksi magnet ( $Wb/m^2$ ), dan ( $l$ ) panjang batang (m). Dengan demikian, hukum Lenz tidak hanya menjelaskan arah arus induksi, tetapi juga menjadi dasar perhitungan besarnya GGL induksi, gaya Lorentz, hingga kondisi kecepatan terminal dalam berbagai aplikasi elektromagnetik.



Kawat PQRS yang terpengaruh oleh gaya gravitasi

### Contoh Soal

Sebuah kumparan dengan 100 lilitan diletakkan dalam medan magnet homogen. Luas penampang tiap lilitan adalah  $0,02 \text{ m}^2$ . Medan magnet berubah dari  $0,2 \text{ T}$  menjadi  $0,8 \text{ T}$  dalam selang waktu  $0,1 \text{ s}$ . Hitung besar GGL induksi rata-rata yang timbul, dan tentukan arah arus induksi berdasarkan hukum Lenz.

#### Pembahasan:

Berdasarkan hukum Faraday:

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Perubahan fluks magnet per lilitan:

$$\Delta\Phi = (B_2 - B_1) \cdot A = (0,8 - 0,2) \times 0,02 = 0,012 \text{ Wb}$$

Sehingga:

$$\varepsilon = -100 \cdot \frac{0,012}{0,1} = -12 \text{ V}$$

Tanda negatif menunjukkan arah arus induksi berlawanan dengan perubahan medan magnet (sesuai hukum Lenz). Karena medan magnet bertambah, maka arus induksi akan menimbulkan medan magnet yang berlawanan arah dengan medan luar.

Jadi, besar GGL induksi adalah  $12 \text{ V}$ , dengan arah arus induksi menentang pertambahan medan magnet.

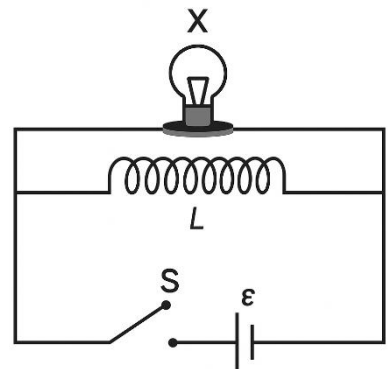


### 3. Induktansi Diri

Pernahkah kamu mendengar istilah induktor? Induktor adalah komponen elektronik berbentuk kumparan yang mampu menyimpan energi dalam bentuk medan magnet. Ketika arus listrik mengalir melalui induktor, medan magnet akan terbentuk di sekitarnya. Inilah yang menjadi dasar terjadinya induksi diri.

Induksi diri adalah kemampuan suatu kumparan untuk menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) induksi akibat perubahan arus listrik yang mengalir pada dirinya sendiri. Besar induktansi diri menunjukkan seberapa besar energi magnetik yang dapat disimpan oleh induktor.

Jika sebuah induktor  $L$ , lampu  $X$ , dan sakelar  $S$  dihubungkan ke sumber tegangan, maka ketika sakelar dibuka atau ditutup, arus listrik dalam rangkaian akan berubah. Perubahan arus ini menyebabkan perubahan fluks magnet di sekitar induktor, sehingga muncul GGL induksi. Hal ini sesuai dengan hukum Faraday–Oersted.



Rangkaian tertutup yang terdiri dari lampu  $X$ , induktor  $L$ , dan sakelar  $S$  yang terhubung dengan sumber tegangan  $\varepsilon$

#### Induktansi Diri pada Kumparan

Menurut hukum Faraday, perubahan fluks magnet pada kumparan dapat menimbulkan GGL induksi yang dirumuskan:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Sementara menurut Joseph Henry, perubahan fluks magnet akibat perubahan arus listrik pada kumparan juga dapat menimbulkan GGL induksi diri, sehingga diperoleh:

$$\varepsilon_s = -L \frac{di}{dt}$$

dengan:

$\varepsilon_s$  = GGL induksi diri (V)

$L$  = induktansi diri (H)

$\frac{di}{dt}$  = laju perubahan arus tiap satuan waktu (A/s)

Kedua persamaan tersebut menunjukkan hubungan bahwa induktansi diri dapat didefinisikan sebagai:

$$L = N \frac{\Phi}{I}$$

dengan:

$L$  = induktansi diri (H)

$\Phi$  = fluks magnetik (Wb)

$N$  = banyak lilitan kumparan

$I$  = kuat arus listrik (A)

#### Induktansi Diri Solenoid

Solenoid adalah kumparan berbentuk tabung dengan lilitan rapat. Medan magnet dalam solenoid dirumuskan:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

Fluks magnet pada solenoid:

$$\Phi = BA = \frac{\mu_0 NI}{l} \times A$$

Maka induktansi diri solenoid:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

**dengan:**

$L$  = induktansi diri solenoid (H)

$\mu_0$  = permeabilitas ruang hampa ( $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am}$ )

$A$  = luas penampang solenoid ( $\text{m}^2$ )

$l$  = panjang solenoid (m)

Jika solenoid berada dalam medium bukan udara, induktansi solenoid menjadi:

$$L_m = \mu \frac{N^2 A}{l} \quad \text{atau} \quad L_m = \mu L$$

dengan  $\mu = \mu_r \mu_0$ , yaitu permeabilitas medium.

### Induktansi Saling atau Timbal Balik

Jika terdapat dua kumparan berdekatan, perubahan arus listrik pada kumparan pertama dapat menimbulkan fluks magnet yang menginduksi GGL pada kumparan kedua. Peristiwa ini disebut induktansi saling atau induktansi timbal balik.

GGL induksi pada kumparan kedua:

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}$$

**dengan:**

$L_{21}$  = induktansi timbal balik kumparan 2 terhadap kumparan 1

Demikian pula, perubahan arus pada kumparan kedua akan menimbulkan GGL pada kumparan pertama:

$$\varepsilon_1 = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

Sehingga induktansi timbal balik dapat dituliskan:

$$L_{12} = \frac{N_1 \Phi_2}{I_2}, \quad L_{21} = \frac{N_2 \Phi_1}{I_1}$$

### Energi Magnetik dan Kerapatan Energi

Energi yang tersimpan dalam sebuah induktor dengan induktansi ( $L$ ) dan arus ( $I$ ):

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

Untuk solenoid:

$$U = \frac{1}{2} LI^2$$

Karena  $L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$  dan  $B = \frac{\mu_0 NI}{l}$ , maka energi dapat dituliskan dalam bentuk:

$$U = \frac{B^2 Al}{2\mu_0}$$

Jika  $V = A l$  adalah volume solenoid, maka:

$$U = \frac{B^2 V}{2\mu_0}$$

Sehingga kerapatan energi magnetik (energi per satuan volume):

$$\mu_m = \frac{U}{V} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

**dengan:**

$U$  = energi magnetik dalam solenoid (J)

$V$  = volume solenoid ( $m^3$ )

$B$  = induksi magnetik ( $Wb/m^2$ )

$\mu_0$  = permeabilitas ruang hampa

$\mu_m$  = rapat energi magnetik ( $J/m^3$ )

### Contoh Soal

Apakah yang terjadi pada kumparan kedua dalam induktansi saling jika terdapat perubahan arus pada kumparan pertama? Jelaskan rumus yang digunakan untuk menghitung GGL induksi pada kumparan kedua.

### Pembahasan:

Pada induktansi saling atau timbal balik, perubahan arus pada kumparan pertama akan menghasilkan GGL induksi pada kumparan kedua. GGL induksi pada kumparan kedua dihitung dengan rumus:

$$\varepsilon_2 = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}$$

$L_{21}$  adalah induktansi timbal balik kumparan kedua terhadap kumparan pertama,

$\frac{dI_1}{dt}$  adalah laju perubahan arus pada kumparan pertama.



### Fakta Fisika di Sekitarmu

Teknologi *wireless charger* memanfaatkan prinsip induktansi diri dan induktansi timbal balik. Arus bolak-balik yang mengalir pada kumparan pengisi menghasilkan medan magnet yang berubah-ubah. Perubahan medan magnet ini menginduksi arus pada kumparan penerima yang terhubung dengan baterai, sehingga baterai dapat terisi tanpa kabel.



Wireless charger – Shutterstock.com.  
1283662381





## 4. Pemanfaatan Induksi Elektromagnetik

### Transformator

Salah satu penerapan penting dari induksi elektromagnetik adalah transformator. Transformator merupakan perangkat yang digunakan untuk mengubah besar tegangan listrik arus bolak-balik (AC). Dengan menggunakan transformator, tegangan dapat dinaikkan (*step-up*) atau diturunkan (*step-down*) sesuai dengan kebutuhan. Namun, perlu diingat bahwa transformator tidak dapat digunakan untuk arus searah (DC), karena prinsip kerjanya memerlukan perubahan medan magnet yang hanya dapat terjadi pada arus bolak-balik.

#### a. Susunan Transformator

Sebuah transformator tersusun atas:

- 1) Inti besi sebagai jalur fluks magnetik.
- 2) Kumparan primer ( $N_p$ ) yang dihubungkan ke sumber tegangan listrik.
- 3) Kumparan sekunder ( $N_s$ ) yang menghasilkan tegangan listrik keluaran.

#### b. Jenis Transformator

Transformator dibagi menjadi dua jenis:

- 1) Transformator step-up, yaitu transformator yang menaikkan tegangan listrik ( $V_p < V_s$ ).
- 2) Transformator step-down, yaitu transformator yang menurunkan tegangan listrik ( $V_p > V_s$ ).

### Prinsip Kerja Transformator

Ketika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, arus yang mengalir akan menimbulkan medan magnet yang berubah-ubah pada inti besi. Perubahan medan magnet ini menghasilkan fluks magnet yang kemudian menginduksi kumparan sekunder.

Fluks magnet pada kumparan primer dapat dinyatakan:

$$d\Phi_p = d(B_p \times A_p)$$

Karena fluks magnet pada kumparan sekunder sama dengan fluks pada kumparan primer, maka:

$$\frac{d\Phi_s}{dt} = \frac{d\Phi_p}{dt}$$

Sehingga:

$$\frac{d(B_s \times A_s)}{dt} = \frac{d(B_p \times A_p)}{dt}$$

Dengan demikian, besarnya GGL induksi yang muncul pada masing-masing kumparan adalah:

$$V_p = \varepsilon_p = -N_p \frac{d\Phi_p}{dt} = -N_p \frac{d(B_p \times A_p)}{dt}$$

$$V_s = \varepsilon_s = -N_s \frac{d\Phi_s}{dt} = -N_s \frac{d(B_s \times A_s)}{dt}$$

### Hubungan Tegangan dan Jumlah Lilitan

Dari persamaan di atas, diperoleh hubungan antara tegangan dengan jumlah lilitan pada transformator:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

Artinya, perbandingan tegangan pada kumparan primer dan sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan pada masing-masing kumparan.

Selain itu, jika transformator dianggap ideal (tanpa rugi energi), maka energi listrik yang masuk ke kumparan primer sama dengan energi listrik yang keluar pada kumparan sekunder. Sehingga berlaku:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

atau

$$V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$$

dengan:

$V_p$  = tegangan primer (V)

$V_s$  = tegangan sekunder (V)

$N_p$  = jumlah lilitan primer

$N_s$  = jumlah lilitan sekunder

$I_p$  = arus listrik primer (A)

$I_s$  = arus listrik sekunder (A)

Persamaan ini menunjukkan bahwa tegangan listrik berbanding lurus dengan jumlah lilitan, tetapi berbanding terbalik dengan kuat arus yang mengalir.

### Efisiensi Transformator

Dalam kenyataannya, tidak ada transformator yang benar-benar ideal. Hal ini karena sebagian energi listrik akan berubah menjadi panas akibat resistansi kawat, arus eddy current, dan histeresis pada inti besi. Oleh sebab itu, efisiensi transformator ( $\eta$ ) tidak pernah mencapai 100%.

Efisiensi transformator didefinisikan sebagai:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

atau dapat juga ditulis:

$$\eta = \frac{P_{in} - P_h}{P_{in}} \times 100\%$$

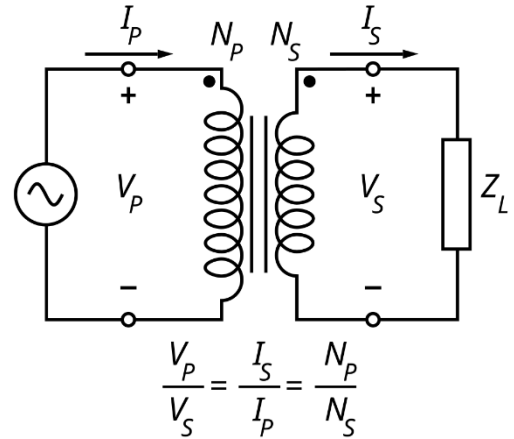
dengan:

$\eta$  = efisiensi transformator

$P_{in}$  = daya listrik masuk (W)

$P_{out}$  = daya listrik keluar (W)

$P_h$  = daya yang hilang (W)



Transformator ideal dihubungkan dengan sumber tegangan  $V_p$  pada sisi primer dan beban impedansi ( $Z_L$ ) pada sisi sekunder, dengan ( $0 < Z_L < \infty$ ) –  
Wikipedia.org

### Contoh Soal

Sebuah transformator step-up memiliki jumlah lilitan primer  $N_p = 500$  lilitan dan lilitan sekunder  $N_s = 2500$  lilitan. Jika tegangan pada kumparan primer adalah  $V_p = 100, V$ , tentukan tegangan pada kumparan sekunder  $V_s$ !

#### Pembahasan:

Rumus hubungan tegangan dan jumlah lilitan pada transformator:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

Maka:

$$V_s = V_p \cdot \frac{N_s}{N_p}$$

Substitusikan nilai yang diketahui:

$$V_s = 100 \cdot \frac{2500}{500}$$

$$V_s = 100 \cdot 5$$

$$V_s = 500, V$$

Jadi, tegangan pada kumparan sekunder adalah 500 V.



## 5. Konsep Arus dan Tegangan Bolak-Balik

Pernahkah kamu bertanya-tanya bagaimana arus listrik bisa digunakan untuk menyalakan peralatan elektronik di rumah? Atau mengapa sebagian besar pembangkit listrik menghasilkan arus bolak-balik (AC) dan bukan arus searah (DC)? Untuk menjawab pertanyaan itu, kita perlu memahami konsep dasar arus dan tegangan bolak-balik.

Generator arus bolak-balik menghasilkan tegangan dan arus listrik yang arahnya berubah-ubah secara periodik terhadap waktu. Perubahan ini mengikuti fungsi sinus dan bergantung pada putaran kumparan dalam medan magnet. Arus dan tegangan bolak-balik memiliki bentuk gelombang sinusoidal yang khas.

Tegangan arus bolak-balik dapat ditulis sebagai:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$$

dengan:

$\varepsilon_m = NBA$  = tegangan maksimum (V)

N = banyak lilitan kumparan

B = induksi magnet (T)

A = luas kumparan (m<sup>2</sup>)

$\omega$  = kecepatan sudut atau frekuensi sudut (rad/s)

t = waktu (s)

$\varepsilon$  = GGL generator AC (V)

Arus listrik bolak-balik dinyatakan dengan:

$$I = I_m \sin \omega t$$

dengan:

I = arus listrik bolak-balik (A)

$I_m$  = arus maksimum (A)

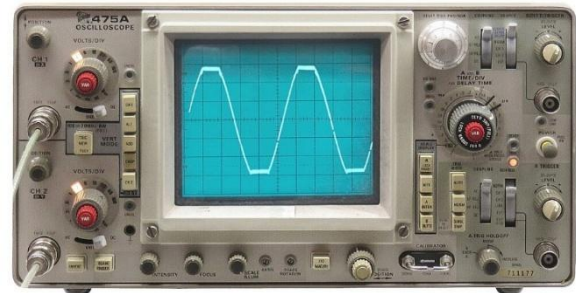
### Nilai Efektif Arus Bolak-Balik ( $I_{ef}$ )

Nilai efektif arus AC (*effective value*) adalah besar arus sebanding dengan arus DC yang menghasilkan efek pemanasan (kalor Joule) sama pada hambatan. Dengan kata lain, arus efektif adalah arus AC yang memberikan jumlah energi setara dengan arus searah dalam waktu tertentu.

Jika sebuah resistor (R) dialiri arus DC ( $I_{ef}$ ) selama selang waktu (T), energi kalor yang dihasilkan:

$$Q_{DC} = I_{ef}^2 R \frac{1}{2} T$$

Apabila resistor yang sama dialiri arus AC ( $i = I_m \sin \omega t$ ), energi kalor yang dihasilkan:



Osiloskop merek Tektronix untuk mengukur beda fase gelombang – Wikipedia.org

$$Q_{AC} = \int_0^{\frac{1}{2}T} i^2 R dt$$

Karena ( $Q_{AC} = Q_{DC}$ ), maka berlaku:

$$I_{ef}^2 R \frac{1}{2} T = \int_0^{\frac{1}{2}T} (I_m^2 \sin^2 \omega t)^2 R dt$$

Sehingga diperoleh:

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Dengan cara serupa, untuk tegangan listrik efektif:

$$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

**dengan:**

$I_{ef}$  = arus efektif (A)

$V_{ef}$  = tegangan efektif (V)

$I_m$  = arus maksimum (A)

$V_m$  = tegangan maksimum (V)

### Nilai Rata-Rata Arus Bolak-Balik

Arus rata-rata pada AC didefinisikan sebagai arus searah yang dapat memindahkan muatan listrik dengan jumlah sama selama waktu tertentu. Secara matematis:

$$I_{rata-rata} = \frac{2I_m}{\pi}$$

Sementara tegangan rata-rata:

$$V_{rata-rata} = \frac{2V_m}{\pi}$$

Alat ukur listrik sederhana, seperti voltmeter dan amperemeter AC rumah tangga, biasanya hanya menunjukkan nilai rata-rata, bukan nilai sesungguhnya setiap saat. Itulah sebabnya ketika kita mengukur tegangan listrik rumah sekitar 220 V, nilai tersebut adalah nilai efektif, bukan nilai maksimum.

### Nilai Maksimum Arus dan Tegangan AC

Nilai puncak (maksimum) dari arus dan tegangan AC berhubungan langsung dengan nilai efektifnya. Hubungan ini dituliskan sebagai:

$$I_m = I_{ef} \sqrt{2}, \quad I_m = \frac{I_{rata}\pi}{2},$$

$$V_m = V_{ef} \sqrt{2}, \quad V_m = \frac{V_{rata}\pi}{2}$$

Dengan demikian, arus dan tegangan AC dapat dijelaskan melalui tiga besaran penting yaitu, nilai efektif, nilai rata-rata, dan nilai maksimum.

### Contoh Soal

Sebuah sumber arus bolak-balik (AC) memiliki arus efektif ( $I_{ef} = 2A$ ) dan tegangan efektif ( $V_{ef} = 220 V$ ). Tentukan besar:

1. Arus maksimum  $I_m$
2. Arus rata-rata  $I_{rata-rata}$
3. Tegangan maksimum  $V_m$
4. Tegangan rata-rata  $V_{rata-rata}$

#### Pembahasan:

Diketahui:

$$I_{ef} = 2A, \quad V_{ef} = 220V$$

Rumus yang digunakan:

$$I_m = I_{ef}\sqrt{2}, \quad I_{rata} = \frac{2I_m}{\pi}$$

$$V_m = V_{ef}\sqrt{2}, \quad V_{rata} = \frac{2V_m}{\pi}$$

1. Hitung arus maksimum:

$$I_m = 2\sqrt{2} = 2,83 A$$

2. Hitung arus rata-rata:

$$I_{rata} = \frac{2(2,83)}{\pi} = 1,80A$$

3. Hitung tegangan maksimum:

$$V_m = 220\sqrt{2} = 311 V$$

4. Hitung tegangan rata-rata:

$$V_{rata} = \frac{2(311)}{\pi} = 198 V$$

Jadi, diperoleh:

$$I_m = 2,83 A, \quad I_{rata} = 1,80 A, \quad V_m = 311 V, \quad V_{rata} = 198 V.$$

## 6. Rangkaian Arus Bolak-Balik

Pernahkah Anda menyalakan televisi atau radio untuk menikmati hiburan sehari-hari? Sebenarnya, bagaimana perangkat tersebut dapat bekerja dengan baik? TV dan radio berfungsi karena menggunakan rangkaian listrik arus bolak-balik (AC) yang menerima gelombang elektromagnetik dengan frekuensi tertentu. Pada bagian ini kita akan mempelajari berbagai jenis rangkaian arus bolak-balik beserta karakteristik masing-masing.

### Rangkaian Resistor pada Arus Bolak-Balik

Jika sebuah resistor dengan hambatan ( $R$ ) dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka berlaku hubungan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}V_{ab} &= V_R = V_m \sin \omega t \\I &= I_m \sin \omega t \\V_R &= IR\end{aligned}$$

dengan:

$V_{ab}$  = beda potensial pada resistor (V)

$V_m$  = tegangan maksimum (V)

$I$  = arus listrik sesaat (A)

$I_m$  = arus maksimum (A)

$R$  = hambatan listrik ( $\Omega$ )

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa tegangan ( $V_R$ ) dan arus ( $I$ ) sefase, artinya keduanya mencapai nilai maksimum dan minimum pada saat yang sama.

### Rangkaian Induktor pada Arus Bolak-Balik

Apabila sebuah kumparan dengan induktansi ( $L$ ) dihubungkan ke sumber AC, maka timbul gaya gerak listrik (GGL) induksi.

$$\varepsilon_{\text{induksi}} = -L \frac{dI}{dt}$$

Dengan menerapkan hukum Kirchhoff, maka:

$$V = V_m \sin \omega t$$

$$I = \frac{V_m}{\omega L} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

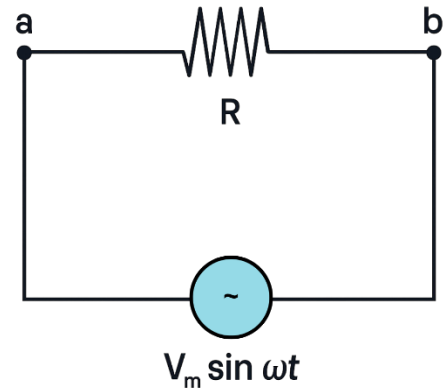
atau dapat dituliskan juga:

$$I = I_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

dengan:

$V$  = tegangan sumber (V)

$L$  = induktansi kumparan (H)



Rangkaian seri antara sumber arus bolak-balik (AC) dengan resistor ( $R$ )

$\omega$  = frekuensi sudut (rad/s)

$I$  = arus listrik (A)

Pada rangkaian induktif, arus tertinggal fase ( $\frac{\pi}{2}$ ) atau  $90^\circ$  dibanding tegangan. Besarnya hambatan listrik yang ditimbulkan induktor disebut reaktansi induktif ( $X_L$ ):

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

Sehingga, tegangan pada induktor dapat dituliskan:

$$V_L = IX_L$$

### Rangkaian Kapasitor pada Arus Bolak-Balik

Ketika sebuah kapasitor dihubungkan ke sumber AC, kapasitor akan menyimpan muatan listrik.

$$q = VC = CV_m \sin \omega t$$

Jika diturunkan terhadap waktu, arus menjadi:

$$I = \frac{dq}{dt} = V_m \omega C \cos \omega t$$

Karena  $(\cos \omega t = \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}))$ , maka:

$$I = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

Artinya, arus listrik mendahului tegangan sebesar ( $\frac{\pi}{2}$ ). Besarnya hambatan listrik yang muncul pada kapasitor disebut reaktansi kapasitif ( $X_C$ ):

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

### Rangkaian Seri Resistor dan Induktor (RL)

Jika sebuah resistor ( $R$ ) disusun seri dengan induktor ( $L$ ), lalu dihubungkan ke sumber AC, maka berlaku:

$$V_{ab} = V_R = IR \quad \text{dan} \quad V_{bc} = V_L = IX_L$$

Karena ( $V_R$ ) sefase dengan arus dan ( $V_L$ ) berbeda fase ( $\frac{\pi}{2}$ ), resultan tegangan dapat ditentukan dengan vektor:

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_L^2}$$

Impedansi total rangkaian RL adalah:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Sudut fase antara arus dan tegangan adalah:

$$\tan \theta = \frac{V_L}{V_R} = \frac{X_L}{R}$$



### Rangkaian Seri Resistor dan Kapasitor (RC)

Apabila resistor (R) disusun seri dengan kapasitor (C), lalu dihubungkan ke sumber AC, maka:

$$V_{ab} = V_R = IR \quad \text{dan} \quad V_{bc} = V_C = IX_C$$

Resultan tegangan dapat ditentukan **dengan**:

$$V = \sqrt{V_R^2 + V_C^2}$$

Impedansi total rangkaian RC adalah:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

Sudut fase antara arus dan tegangan:

$$\tan \theta = \frac{V_C}{V_R} = \frac{X_C}{R}$$

### Rangkaian Seri RLC

Jika resistor (R), induktor (L), dan kapasitor (C) disusun seri, maka setiap komponen memiliki sifat masing-masing. Persamaan umum rangkaian adalah:

$$V = \sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2}$$

Impedansi total rangkaian RLC:

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

Sudut fase arus terhadap tegangan:

$$\tan \theta = \frac{V_L - V_C}{V_R} = \frac{X_L - X_C}{R}$$

### Resonansi dalam Rangkaian RLC Seri

Resonansi terjadi jika ( $X_L = X_C$ ), sehingga arus sefase dengan tegangan ( $\theta = 0$ ) dan impedansi hanya bergantung pada (R).

Kondisi resonansi:

$$X_L = X_C$$

$$\omega^2 = \frac{1}{LC}$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Arus maksimum pada kondisi resonansi:

$$I_{res} = \frac{V}{R}$$

### Contoh Soal

Sebuah rangkaian listrik AC terdiri dari resistor  $R = 50, \Omega$  yang dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik  $V = 200 \sin (100\pi t)$  volt . Tentukan:

1. Arus maksimum pada rangkaian.
2. Arus efektif yang mengalir.
3. Hubungan fasa antara arus dan tegangan.

#### Pembahasan:

Diketahui:

$$R = 50 \Omega, \quad V = V_m \sin \omega t, \quad V_m = 200 \text{ V}$$

1. Arus maksimum:

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{200}{50} = 4 \text{ A}$$

2. Arus efektif:

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{4}{\sqrt{2}} = 2,83 \text{ A}$$

3. Karena rangkaian hanya terdiri dari resistor, maka arus sefase dengan tegangan. Artinya beda fasa ( $\theta = 0^\circ$ ).

Jawaban akhir:

$$I_m = 4 \text{ A}$$

$$I_{ef} = 2,83 \text{ A}$$

Arus dan tegangan sefase  $\theta = 0^\circ$



## 7. Daya dalam Rangkaian Arus Bolak-Balik

Jika suatu rangkaian seri RLC dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik (V), maka kuat arus yang mengalir pada rangkaian ditentukan oleh besar tegangan dan impedansi total rangkaian. Hubungan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

dengan:

$I$  = arus listrik (A)

$V$  = tegangan sumber (V)

$Z$  = impedansi total ( $\Omega$ )

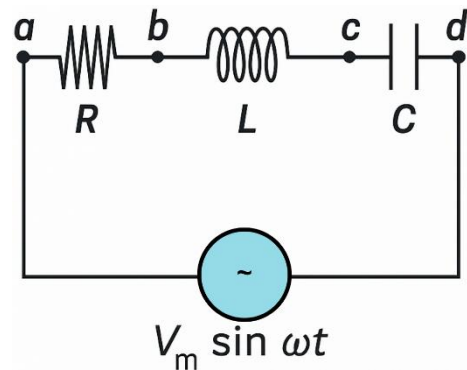
$R$  = hambatan resistor ( $\Omega$ )

$X_L$  = reaktansi induktif ( $\Omega$ )

$X_C$  = reaktansi kapasitif ( $\Omega$ )

Dengan demikian, daya listrik pada rangkaian AC dapat dituliskan:

$$P = I^2 Z \quad \text{atau} \quad P = \frac{V^2}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$



Rangkaian yang terdiri atas komponen  $R$ ,  $L$ , dan  $C$ .

### Daya Semu dan Daya Sesungguhnya

Daya yang dihitung menggunakan persamaan di atas disebut daya semu, karena nilainya lebih besar dibandingkan dengan daya yang benar-benar dikonsumsi oleh resistor. Daya sesungguhnya adalah daya yang terukur oleh alat ukur wattmeter. Hubungannya dituliskan sebagai berikut:

$$P' = I^2 R$$

dengan:

$P$  = daya semu (Watt)

$P'$  = daya sesungguhnya (Watt)

$R$  = hambatan resistor ( $\Omega$ )

### Faktor Daya

Perbandingan antara daya sesungguhnya dengan daya semu disebut faktor daya. Faktor daya menunjukkan seberapa efisien rangkaian menggunakan energi listrik yang diberikan oleh sumber.

$$\text{Faktor daya} = \frac{P'}{P}$$

Jika digambarkan dalam bentuk segitiga fasor, faktor daya berkaitan dengan cosinus sudut fasa ( $\cos \theta$ ):

$$\frac{P'}{P} = \frac{R}{Z} = \cos \theta$$

dengan:

$Z$  = impedansi total ( $\Omega$ )

$\theta$  = sudut fase antara arus dan tegangan

## Persamaan Umum Daya Sesungguhnya

Dengan memperhatikan faktor daya, persamaan daya sesungguhnya dapat dituliskan dalam beberapa bentuk:

$$P' = VI \cos \theta$$

$$P' = I^2 Z \cos \theta$$

dengan:

$P'$  = daya sesungguhnya (W)

$V$  = tegangan sumber (V)

$I$  = arus listrik (A)

$\cos \theta$  = faktor daya

### Contoh Soal

Sebuah rangkaian RLC seri dihubungkan dengan sumber tegangan AC  $V = 220$  V. Hambatan resistor dalam rangkaian adalah  $R = 50 \Omega$ , reaktansi induktif  $X_L = 120$ , dan reaktansi kapasitif  $X_C = 30$ .

Tentukan:

1. Besar arus yang mengalir dalam rangkaian.
2. Daya sesungguhnya yang dikonsumsi rangkaian.
3. Faktor daya rangkaian.

Pembahasan:

1. Hitung impedansi rangkaian:

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

$$Z = \sqrt{50^2 + (120 - 30)^2}$$

$$Z = \sqrt{2500 + 8100} = \sqrt{10600} = 102,96$$

Besar arus:

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{220}{102,96} = 2,14 \text{ A}$$

2. Daya sesungguhnya:

$$P' = I^2 R = (2,14)^2 \times 50$$

$$P' = 4,58 \times 50 = 229 \text{ W}$$

3. Faktor daya:

$$\cos \theta = \frac{R}{Z} = \frac{50}{102,96} = 0,49$$

Jawaban Akhir:

1. Arus rangkaian = 2,14 A
2. Daya sesungguhnya = 229 W
3. Faktor daya = 0,49

## Kegiatan Kelompok

### Menelusuri Pengaruh Kecepatan Perubahan Medan Magnet terhadap Besar GGL Induksi

**Tujuan:** Menyelidiki hubungan antara kecepatan gerak magnet terhadap kumparan dan besar GGL induksi yang timbul, serta memahami konsep perubahan fluks magnetik secara kontekstual.

#### Dasar Teori:

Menurut Hukum Faraday, GGL induksi timbul karena perubahan fluks magnetik terhadap waktu. Semakin cepat perubahan fluks magnetik, semakin besar nilai GGL yang dihasilkan. Faktor lain yang memengaruhi GGL induksi adalah jumlah lilitan kumparan dan kekuatan medan magnet. Ketika magnet digerakkan cepat ke arah kumparan, fluks magnetik berubah lebih cepat, sehingga GGL induksi yang terukur juga meningkat.

#### Alat dan Bahan

1. Magnet batang
2. Galvanometer atau sensor tegangan (bisa menggunakan alat digital sederhana)
3. Kabel jumper
4. Kumparan (induktor) dengan jumlah lilitan tetap, misalnya 300 lilitan
5. Stopwatch atau aplikasi pengukur waktu di ponsel
6. Penggaris atau pita ukur

#### Cara Kerja

1. Susun rangkaian seperti pada skema berikut: magnet digerakkan mendekati kumparan yang terhubung ke galvanometer.
2. Tentukan jarak awal magnet dari kumparan, misalnya 10 cm.
3. Gerakkan magnet perlahan-lahan menuju kumparan, lalu amati simpangan jarum galvanometer.
4. Ulangi percobaan dengan kecepatan sedang dan kecepatan cepat (diukur dengan stopwatch).
5. Catat besar simpangan galvanometer pada setiap variasi kecepatan.
6. Diskusikan hasilnya untuk menemukan hubungan antara kecepatan perubahan medan magnet dan besar GGL induksi.
7. Buat kesimpulan bersama berdasarkan data pengamatan.

#### Pertanyaan Diskusi

1. Bagaimana hubungan antara kecepatan gerak magnet dan besar GGL induksi?
2. Apa yang terjadi pada arah arus induksi ketika arah gerak magnet dibalik?
3. Bagaimana hasil percobaan ini membuktikan kebenaran Hukum Faraday dan Lenz?

## Rangkuman

- 1) Fluks magnet adalah jumlah garis gaya magnet yang menembus suatu bidang permukaan. Besarnya fluks bergantung pada kuat medan magnet, luas bidang, dan sudut antara medan magnet dengan bidang tersebut.

$$\Phi = BA \cos \theta = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

- 2) Perubahan fluks magnetik pada suatu rangkaian menimbulkan gaya gerak listrik (GGL) induksi. Arah arus induksi menentang perubahan fluks yang menyebabkannya, sesuai hukum Lenz.

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\varepsilon = NBA\omega \sin \omega t$$

$$v_t = \frac{mgR}{B^2 l^2}$$

- 3) Induktansi diri terjadi ketika perubahan arus pada kumparan menimbulkan GGL induksi pada dirinya sendiri. Besarnya induktansi bergantung pada jumlah lilitan dan geometri kumparan.

$$\varepsilon_s = -L \frac{di}{dt}$$

$$L = N \frac{\Phi}{I}$$

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

$$W = \frac{1}{2} LI^2$$

$$\mu_m = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

- 4) Transformator digunakan untuk mengubah besar tegangan AC berdasarkan perbandingan jumlah lilitan antara kumparan primer dan sekunder. Efisiensinya bergantung pada rugi energi akibat panas dan histeresis.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

$$V_p I_p = V_s I_s$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

- 5) Arus dan tegangan bolak-balik (AC) berubah secara periodik mengikuti fungsi sinusoidal. Nilai efektifnya menunjukkan besaran yang setara dengan arus DC dalam menghasilkan panas.

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t, \quad I = I_m \sin \omega t$$

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$I_{rata} = \frac{2I_m}{\pi}, \quad V_{rata} = \frac{2V_m}{\pi}$$

- 6) Rangkaian AC terdiri dari resistor, induktor, dan kapasitor yang memengaruhi besar arus serta pergeseran fase antara arus dan tegangan. Kondisi resonansi terjadi ketika reaktansi induktif dan kapasitif bernilai sama.

$$X_L = \omega L, \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$Z_{RL} = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad Z_{RC} = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$Z_{RLC} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

- 7) Daya sesungguhnya pada rangkaian AC tergantung pada faktor daya ( $\cos\theta$ ) yang menunjukkan efisiensi penggunaan energi listrik.

$$P' = VI \cos \theta$$

$$\cos \theta = \frac{R}{Z}$$

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



### Latihan Soal

1. Sebuah bidang seluas  $0,02 \text{ m}^2$  berada dalam medan magnet homogen  $0,5 \text{ T}$  dan membentuk sudut  $60^\circ$  terhadap arah garis gaya magnet. Besar fluks magnetik yang menembus bidang tersebut adalah ....
  - A.  $0,0025 \text{ Wb}$
  - B.  $0,004 \text{ Wb}$
  - C.  $0,005 \text{ Wb}$
  - D.  $0,01 \text{ Wb}$
2. Sebuah kumparan memiliki 200 lilitan dan berada dalam medan magnet yang berubah sebesar  $0,01 \text{ Wb}$  selama  $0,1 \text{ s}$ . Besar GGL induksi yang timbul pada kumparan adalah ....
  - A.  $0,02 \text{ V}$
  - B.  $0,1 \text{ V}$
  - C.  $0,2 \text{ V}$
  - D.  $0,5 \text{ V}$
3. Sebuah solenoid memiliki 1000 lilitan, luas penampang  $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , dan panjang  $0,5 \text{ m}$ . Hitung induktansi diri solenoid tersebut (gunakan  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Am}$ ).
  - A.  $2,5 \times 10^{-3} \text{ H}$
  - B.  $4,8 \times 10^{-3} \text{ H}$
  - C.  $5,0 \times 10^{-3} \text{ H}$
  - D.  $6,3 \times 10^{-3} \text{ H}$
4. Sebuah transformator step-down memiliki lilitan primer 1000 lilitan dan sekunder 200 lilitan. Jika tegangan primer  $220 \text{ V}$ , maka tegangan sekunder yang dihasilkan adalah ....
  - A.  $22 \text{ V}$
  - B.  $44 \text{ V}$
  - C.  $110 \text{ V}$
  - D.  $440 \text{ V}$
5. Sebuah generator AC menghasilkan tegangan maksimum  $311 \text{ V}$ . Berapakah nilai tegangan efektifnya?
  - A.  $110 \text{ V}$
  - B.  $155 \text{ V}$
  - C.  $220 \text{ V}$
  - D.  $311 \text{ V}$
6. Sebuah rangkaian RLC seri memiliki  $R = 30 \Omega$ ,  $L = 0,1 \text{ H}$ , dan  $C = 100 \mu\text{F}$ . Jika frekuensi sumber  $50 \text{ Hz}$ , tentukan impedansi total rangkaian!
  - A.  $20,5 \Omega$
  - B.  $30,0 \Omega$
  - C.  $35,3 \Omega$
  - D.  $40,5 \Omega$

7. Sebuah rangkaian AC memiliki tegangan efektif 220 V dan arus efektif 5 A dengan faktor daya 0,8. Besar daya sesungguhnya yang dikonsumsi rangkaian tersebut adalah ....
- A. 880 W
  - B. 900 W
  - C. 1100 W
  - D. 1320 W

Akses latihan soal  
lainnya di sini yuk!



Latihan Soal Fisika  
Kelas 12 BAB 4

## Referensi

Giancoli, D. C. (2005). *Fisika: Prinsip dan Aplikasi* (Edisi ke-5). Jakarta: Erlangga.

Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2014). *Fundamentals of Physics* (10th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* (10th ed.). Boston, MA: Cengage Learning.

Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Physics for Scientists and Engineers* (6th ed.). New York, NY: W. H. Freeman.

Sears, F. W., Zemansky, M. W., & Young, H. D. (2012). *Fisika Universitas: Listrik dan Magnet* (Edisi ke-12). Jakarta: Erlangga.

Kemendikbud. (2021). *Modul Ajar IPA Fisika Kelas XII: Induksi Elektromagnetik (Kurikulum Merdeka)*. Jakarta: Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia.

# BAB 5: RADIASI GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK: KONSEP, SIFAT, DAN APLIKASINYA

## Karakter Pelajar Pancasila

**Bergotong-royong:** Bekerja sama menganalisis penerapan radiasi.

**Bernalar kritis:** Mengevaluasi data dan informasi ilmiah.

**Mandiri:** Mempelajari konsep radiasi secara aktif.

**Kreatif:** Mengembangkan ide pemanfaatan radiasi.

• **Kata Kunci:** Cahaya tampak, Gelombang mikro, Gelombang radiol, Sinar gama, Sinar inframerah, Sinar ultraviolet, Sinar-X, Spektrum gelombang elektromagnetik, Radiasi elektromagnetik, Indeks bias, Teori Maxwell

**Tujuan Pembelajaran: Memahami konsep Konsep Radiasi Gelombang Elektromagnetik dan Penerapannya**

### 1. Memaparkan proses terbentuknya gelombang elektromagnetik

- ▷ Menjelaskan hubungan antara medan listrik dan medan magnet dalam pembentukan gelombang elektromagnetik.
- ▷ Menguraikan peran percepatan muatan listrik dalam menghasilkan gelombang elektromagnetik.

### 2. Mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi kecepatan rambat gelombang elektromagnetik

- ▷ Menjelaskan pengaruh sifat medium terhadap kecepatan rambat gelombang.
- ▷ Menguraikan hubungan antara indeks bias dan kecepatan rambat gelombang elektromagnetik.

### **3. Menguraikan berbagai jenis spektrum gelombang elektromagnetik**

- ▷ Menjelaskan karakteristik setiap bagian spektrum dari gelombang radio hingga sinar gama.
- ▷ Mengaitkan panjang gelombang dan frekuensi dengan energi gelombang pada spektrum elektromagnetik.

### **4. Mengidentifikasi karakteristik utama gelombang elektromagnetik**

- ▷ Menjelaskan sifat perambatan gelombang yang tidak memerlukan medium.
- ▷ Menguraikan sifat polarisasi, interferensi, dan difraksi pada gelombang elektromagnetik.

### **5. Menganalisis fenomena yang berkaitan dengan radiasi gelombang elektromagnetik serta penerapannya**

- ▷ Mengkaji penggunaan radiasi gelombang elektromagnetik pada teknologi komunikasi, medis, dan industri.
- ▷ Menilai dampak positif dan negatif radiasi gelombang elektromagnetik terhadap kehidupan manusia.

### **6. Mengidentifikasi manfaat dan risiko radiasi gelombang elektromagnetik dalam kehidupan sehari-hari**

- ▷ Menjelaskan peran gelombang elektromagnetik dalam mendukung aktivitas manusia.
- ▷ Menguraikan potensi bahaya paparan radiasi yang berlebihan terhadap Kesehatan dan lingkungan.



**F I T R I**



## 1. Memahami Spektrum Gelombang Elektromagnetik

Pernahkah kamu mendengar bahwa cahaya yang kita lihat hanyalah “sebagian kecil” dari gelombang yang ada di alam? Sebenarnya, ada banyak jenis gelombang lain—mulai dari gelombang radio untuk siaran musik, sinar inframerah yang digunakan remote TV, hingga sinar-X untuk memeriksa tulang. Semua gelombang ini termasuk dalam spektrum elektromagnetik.

Spektrum elektromagnetik adalah urutan gelombang elektromagnetik yang dibedakan berdasarkan panjang gelombang dan frekuensinya. Meskipun berbeda-beda, semua gelombang ini bergerak dengan kecepatan yang sama di ruang hampa, yaitu kecepatan cahaya.

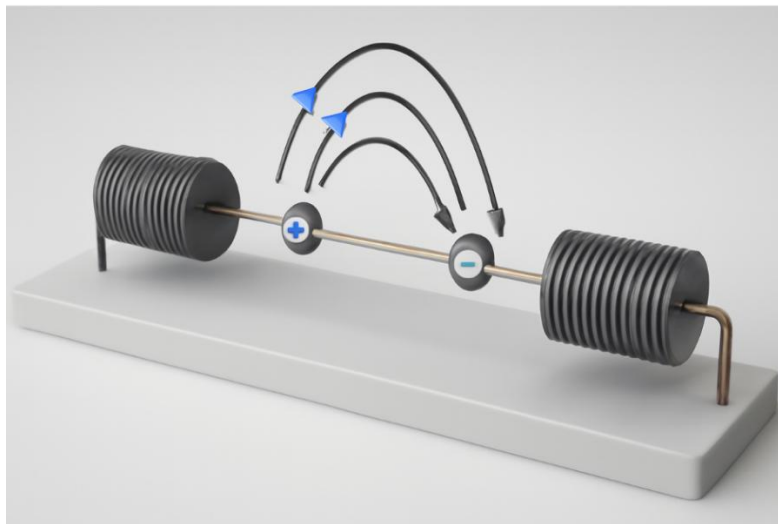
### Pemikiran Maxwell tentang Gelombang Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik mulai dikenal pada abad ke-19 berkat karya **James Clerk Maxwell** (1831–1879). Maxwell menggabungkan berbagai hukum tentang medan listrik dan medan magnet dari teori Oersted, Faraday, dan Ampere.

- Teori Oersted: Arus listrik yang mengalir melalui kawat penghantar dapat menghasilkan medan magnet di sekitarnya.
- Teori Faraday: Perubahan medan magnet dapat memicu timbulnya medan listrik.

Maxwell menyimpulkan bahwa perubahan medan magnet akan menghasilkan medan listrik, dan sebaliknya, perubahan medan listrik akan menghasilkan medan magnet. Interaksi timbal balik ini menjadi dasar terbentuknya gelombang elektromagnetik.

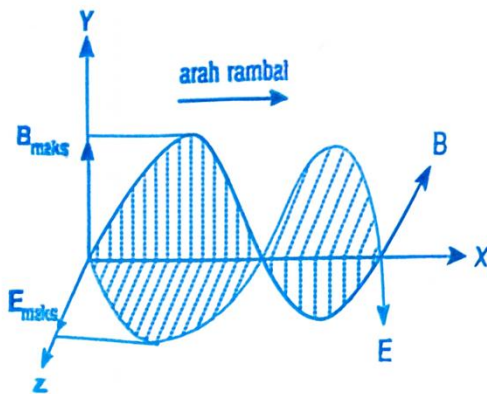
Dalam percobaannya, Maxwell menggunakan bola isolator yang diberi muatan positif dan negatif, ditempatkan pada ujung-ujung pegas. Getaran harmonik yang terjadi menyebabkan jarak antar bola berubah-ubah, sehingga medan listrik di sekitarnya ikut berubah. Perubahan ini memicu timbulnya medan magnet yang juga berubah secara periodik, membentuk gelombang elektromagnetik yang merambat ke segala arah.



Dua bola hitam bermuatan listrik tak sejenis yang menghasilkan medan listrik – Ilustrasi Penerbit



## Perambatan Gelombang Elektromagnetik



Gambar ini menunjukkan arah getaran medan listrik (E) dan medan magnetik (B) yang saling tegak lurus dan bergerak seiring dengan arah rambat gelombang.– Ilustrasi Penerbit

Gelombang elektromagnetik adalah **gelombang transversal** di mana medan listrik (E) dan medan magnet (B) bergetar saling tegak lurus satu sama lain serta tegak lurus terhadap arah rambatnya.

Menurut Maxwell, gelombang elektromagnetik tidak memerlukan medium untuk merambat. Di ruang hampa, kecepatan perambatannya bergantung pada **permeabilitas magnet** ( $\mu\mu$ ) dan **permitivitas listrik** ( $\epsilon\epsilon$ ).

Besar kecepatan gelombang elektromagnetik di ruang hampa:

$$c = 1/\mu_0\epsilon_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}}$$

dengan:

$c$  = kecepatan cahaya/gelombang elektromagnetik di ruang hampa ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

$\mu_0\mu_0$  = permeabilitas ruang hampa ( $4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A} \cdot \text{m}$ )

$\epsilon_0\epsilon_0$  = permitivitas ruang hampa ( $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ )

Jika gelombang merambat pada medium selain hampa, kecepatan perambatannya:

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

Hipotesis Maxwell terbukti benar berkat percobaan **Heinrich Rudolf Hertz** (1857–1894) pada tahun 1887. Hertz menggunakan kumparan primer dan sekunder yang dihubungkan ke bola elektroda, serta loop kawat dengan celah kecil. Ketika arus listrik di kumparan berubah cepat, timbul GGL induksi yang memicu loncatan bunga api antara elektroda. Loncatan serupa juga terdeteksi di loop kawat, membuktikan adanya gelombang elektromagnetik yang merambat dari sumber ke penerima.

Dari percobaannya, Hertz mengukur kecepatan gelombang sebesar  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ , sama dengan kecepatan cahaya di ruang hampa.

**Sifat-sifat gelombang elektromagnetik:**

- Medan listrik dan medan magnet bergetar saling tegak lurus dan tegak lurus terhadap arah rambat.
- Tidak bermuatan listrik (lintasannya garis lurus).
- Tidak memiliki massa, sehingga tidak dipengaruhi gravitasi.
- Dapat merambat di ruang hampa atau udara dengan kecepatan  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .
- Bersifat transversal.
- Mengalami pemantulan, pembiasan, interferensi, difraksi, dan polarisasi.



Hubungan antara kecepatan rambat, frekuensi, dan panjang gelombang:

$$c = f\lambda \quad c = f\lambda$$

dengan:

$c$  = kecepatan gelombang elektromagnetik di ruang hampa

$f$  = frekuensi (Hz)

$\lambda$  = panjang gelombang (m)

### Rangkaian Jenis Gelombang Elektromagnetik

**Spektrum gelombang elektromagnetik** adalah urutan gelombang elektromagnetik berdasarkan frekuensi atau panjang gelombangnya. Dalam ruang hampa, semua gelombang merambat dengan kecepatan sama ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ).

Urutan spektrum dari frekuensi rendah ke tinggi (atau panjang gelombang besar ke kecil) adalah:



Gelombang Radio

Gelombang Mikro

Sinar  
Infamerah

Cahaya  
Tampak

Sinar  
Ultraviolet

Sinar - X

Sinar  
Gamma

Jenis Gelombang	Frekuensi	Panjang Gelombang
<b>Gelombang radio</b>	$< 10^9 \text{ Hz}$	$> 0,3 \text{ m}$
<b>Gelombang mikro</b>	$10^9 - 10^{11} \text{ Hz}$	$3 \text{ mm} - 0,3 \text{ m}$
<b>Sinar inframerah</b>	$10^{11} - 10^{14} \text{ Hz}$	$3 \text{ }\mu\text{m} - 3 \text{ mm}$
<b>Cahaya tampak</b>	$10^{14} - 10^{15} \text{ Hz}$	$0,3 \text{ }\mu\text{m} - 3 \text{ }\mu\text{m}$
<b>Sinar ultraviolet</b>	$= 10^{15} - 10^{17} \text{ Hz}$	$3 \text{ nm} - 0,3 \text{ }\mu\text{m}$
<b>Sinar-X</b>	$10^{17} - 10^{20} \text{ Hz}$	$3 \text{ pm} - 3 \text{ nm}$
<b>Sinar gamma</b>	$> 10^{20} \text{ Hz}$	$< 3 \text{ pm}$

### Contoh Soal

Jelaskan hubungan antara frekuensi dan panjang gelombang pada spektrum elektromagnetik, serta berikan contoh perbandingan antara gelombang radio dan sinar-X!

#### Pembahasan

Frekuensi dan panjang gelombang memiliki hubungan **berbanding terbalik**, yang dijelaskan dengan persamaan:

$$c = \lambda \cdot f$$

dengan  $c$  adalah cepat rambat cahaya ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ),  $\lambda$  adalah panjang gelombang, dan  $f$  adalah frekuensi. Artinya, semakin **besar frekuensi**, maka semakin **pendek panjang gelombangnya**, begitu juga sebaliknya.

Contohnya:

- ▷ **Gelombang radio** memiliki frekuensi rendah ( $< 10^9 \text{ Hz}$ ) sehingga panjang gelombangnya sangat besar, yaitu lebih dari 0,3 m.
- ▷ **Sinar-X** memiliki frekuensi tinggi ( $10^{17} - 10^{20} \text{ Hz}$ ) sehingga panjang gelombangnya sangat pendek, yaitu sekitar 3 pm – 3 nm.

Dengan demikian, spektrum gelombang elektromagnetik menunjukkan pola teratur di mana frekuensi naik berarti panjang gelombang turun, namun cepat rambat gelombang tetap konstan di ruang hampa.



### Fakta Fisika di Sekitarmu

#### Penemuan Wi-Fi yang Revolusioner

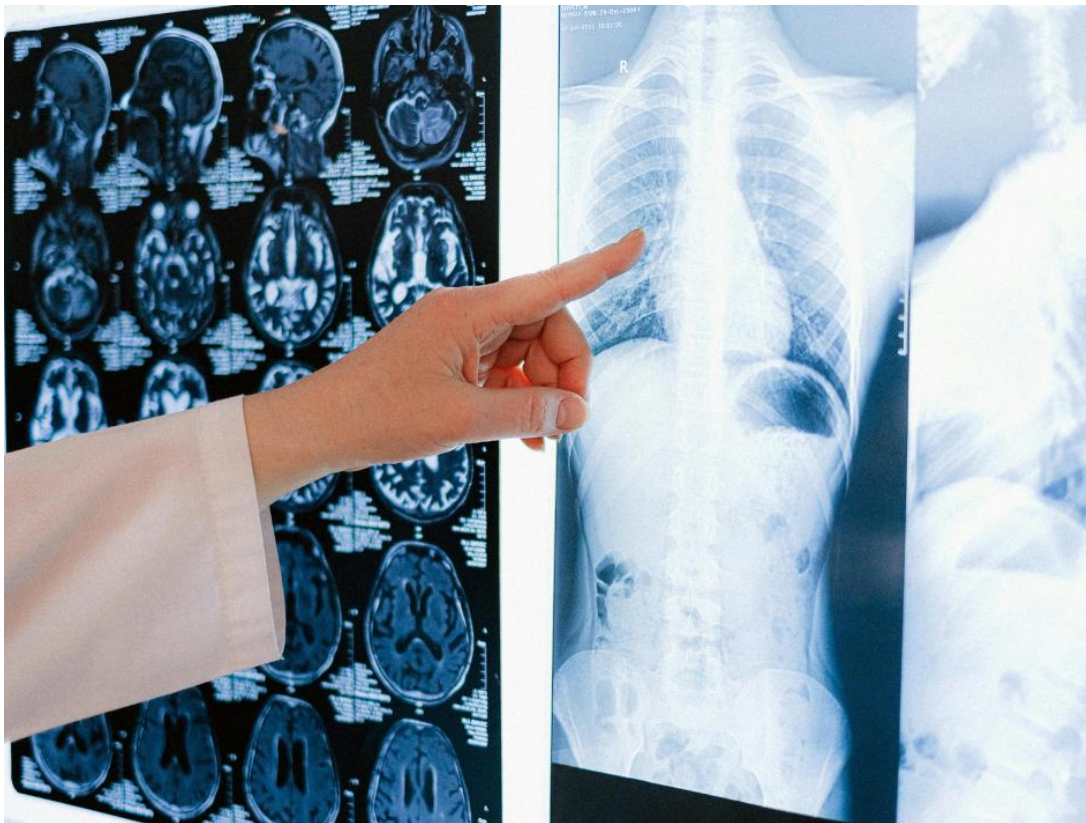
Tahukah kamu bahwa teknologi Wi-Fi yang kita gunakan setiap hari pertama kali ditemukan di laboratorium di Australia? Wi-Fi berasal dari penemuan yang dilakukan oleh ilmuwan asal Australia, Dr. John O'Sullivan, dan timnya di Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) pada tahun 1992. Mereka awalnya menciptakan teknologi untuk mendeteksi lubang hitam di ruang angkasa, namun teknologi ini justru menjadi dasar untuk koneksi nirkabel yang kita kenal sebagai Wi-Fi!



Jaringan WIFI – Canva.com



## 2. Asal dan Sumber Radiasi Gelombang Elektromagnetik



*Sinar-X dipakai dokter untuk memeriksa tulang dan organ dalam– Canva.com*

Setiap hari kita dikelilingi oleh berbagai bentuk radiasi elektromagnetik, baik yang bisa kita lihat maupun yang tidak kasat mata. Cahaya matahari yang menerangi, sinyal ponsel yang kita gunakan untuk berkomunikasi, hingga sinar-X yang dipakai dokter untuk memeriksa tulang, semuanya adalah contoh nyata keberadaan radiasi elektromagnetik.

Untuk memahami dari mana radiasi tersebut berasal, kita perlu mengetahui bahwa sumber radiasi elektromagnetik dapat muncul secara alami maupun dibuat oleh manusia melalui teknologi. Inilah yang kemudian dibedakan menjadi dua kelompok besar, yaitu sumber alami dan sumber buatan.

### Jenis Sumber Radiasi Elektromagnetik

Sumber radiasi elektromagnetik dapat dibedakan menjadi dua kategori utama:

#### a. Sumber alami

Meliputi radiasi yang berasal dari fenomena alam, seperti pancaran Matahari, bintang, sinar gamma dari kerak Bumi, radiasi akibat peluruhan radon dan thorium di atmosfer, radioaktivitas alami, dan radiasi dari sinar kosmik.

#### b. Sumber buatan

Dihasilkan melalui teknologi atau aktivitas manusia, seperti radiasi dari ledakan nuklir, penggunaan radiasi dalam bidang medis (misalnya sinar-X dan terapi radiasi), osilasi listrik, penembakan elektron pada keping logam di dalam tabung vakum, rangkaian listrik berbasis transistor, serta jaringan listrik bertegangan tinggi.

## Hubungan Arah Medan Listrik, Medan Magnet, dan Arah Rambat

Dalam gelombang elektromagnetik, medan listrik ( $E$ ) dan medan magnet ( $B$ ) berosilasi saling tegak lurus, dan keduanya tegak lurus terhadap arah rambat gelombang. Misalnya, jika gelombang merambat ke arah sumbu  $Y$ , maka medan listrik dan medan magnet berada di dua arah yang saling tegak lurus lainnya.

Besar medan listrik dan medan magnet dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$B = B_{\text{maks}} \sin(\omega t - kx)$$

$$E = E_{\text{maks}} \sin(\omega t - kx)$$

dengan:

$B_{\text{maks}}$  = amplitudo gelombang medan magnet (T)

$E_{\text{maks}}$  = amplitudo gelombang medan listrik (N/C)

$\omega$  = kecepatan sudut (rad/s)

$k$  = bilangan gelombang ( $m^{-1}$ )

$t$  = waktu rambat (s)

## Hubungan Matematis antara $E_m$ dan $B_m$

Gelombang elektromagnetik terdiri atas **medan listrik (EE)** dan **medan magnet (BB)** yang saling tegak lurus satu sama lain dan juga tegak lurus arah rambat gelombang. Hubungan keduanya bisa diturunkan dari persamaan Maxwell.

Dari turunan matematis, diperoleh:

$$kE_{\text{maks}} = \omega B_{\text{maks}}$$

Dengan  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  (bilangan gelombang) dan  $\omega = 2\pi f$  (frekuensi sudut).

Maka:

$$E_{\text{maks}} = f\lambda B_{\text{maks}}$$

Karena  $f\lambda = c$  (kecepatan cahaya), didapat:

$$E_{\text{maks}} = c B_{\text{maks}}$$

Artinya, **besar medan listrik maksimum sebanding dengan besar medan magnet maksimum**, dengan konstanta perbandingan adalah kecepatan cahaya.

Gelombang elektromagnetik membawa energi saat merambat. Energi per satuan luas per satuan waktu disebut **intensitas (I)**. Besarnya intensitas sebanding dengan hasil kali medan listrik dan medan magnet:

$$I = \frac{E \cdot B}{\mu_0}$$

Jika kita substitusikan nilai  $E$  dan  $B$ , maka diperoleh:

$$I = \frac{E_{\text{maks}} B_{\text{maks}} \sin^2(\omega t - kx)}{\mu_0}$$

Intinya,  $E_{\text{maks}} = c B_{\text{maks}}$ , Energi gelombang tergantung pada hasil kali  $E$  dan  $B$ . Kecepatan cahaya  $c$  menjadi penghubung antara medan listrik dan medan magnet.

## Intensitas Maksimum dan Minimum

Intensitas gelombang elektromagnetik bergantung pada faktor  $\sin^2(\omega t - kx)$ .

a. Jika  $\sin^2(\omega t - kx) = 1 \rightarrow$  intensitas maksimum:

$$I_{\text{maks}} = \frac{B_{\text{maks}} E_{\text{maks}}}{\mu_0}$$

b. Jika  $\sin^2(\omega t - kx) = 0 \rightarrow$  intensitas minimum:

$$I_{\text{min}} = 0$$

c. Karena intensitas selalu berubah-ubah (naik turun), maka kita menggunakan **rata-rata intensitas**:

$$\bar{I} = \frac{B_{\text{maks}} E_{\text{maks}}}{2\mu_0}$$

## Hubungan Intensitas dengan Kecepatan Cahaya

Kita tahu hubungan penting:  $E_{\text{maks}} = c B_{\text{maks}}$ . Sehingga, intensitas rata-rata bisa ditulis dalam dua bentuk:

a. Dalam bentuk medan magnet:  $\bar{I} = \frac{c B_{\text{maks}}^2}{2\mu_0}$

b. Dalam bentuk medan listrik:  $\bar{I} = \frac{E_{\text{maks}}^2}{2c\mu_0}$

dengan

$\bar{I}$  = intensitas rata-rata gelombang elektromagnetik (W/m<sup>2</sup>)

$B_{\text{maks}}$  = amplitudo medan magnet (Tesla)

$E_{\text{maks}}$  = amplitudo medan listrik (N/C)

$c = 3 \times 10^8$  m/s (kecepatan cahaya)

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m (permeabilitas ruang hampa)

### Contoh Soal

Sebuah gelombang elektromagnetik di ruang hampa memiliki amplitudo medan listrik maksimum  $E_{\text{maks}} = 300 \text{ N/C}$ . Tentukan intensitas rata-rata gelombang tersebut!

#### Pembahasan

Diketahui:

$$\begin{aligned}E_{\text{maks}} &= 300 \text{ N/C} \\c &= 3 \times 10^8 \text{ m/s} \\\mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}\end{aligned}$$

Rumus intensitas rata-rata dengan medan listrik:

$$\bar{I} = \frac{E_{\text{maks}}^2}{2c\mu_0}$$

Substitusi nilai:

$$\begin{aligned}\bar{I} &= \frac{(300)^2}{2 \cdot (3 \times 10^8) \cdot (4\pi \times 10^{-7})} \\&= \frac{90000}{2 \cdot 3 \times 10^8 \cdot 1,256 \times 10^{-6}} \\&= \frac{90000}{753,6} \\\bar{I} &\approx 119,4 \text{ W/m}^2\end{aligned}$$

**Jawaban:** Intensitas rata-rata gelombang elektromagnetik adalah **sekitar 119 W/m<sup>2</sup>**.



### Fakta Fisika di Sekitarmu

#### Terapi Inframerah di Cina

Tahukah kamu? Di Cina, terapi menggunakan gelombang inframerah telah digunakan selama berabad-abad dalam pengobatan tradisional. Gelombang inframerah kini digunakan dalam berbagai alat medis modern untuk meredakan nyeri sendi, meningkatkan sirkulasi darah, dan membantu penyembuhan luka. Teknologi ini semakin populer di klinik-klinik kesehatan dan rumah sakit di Cina.



*Negara Cina terkenal dengan pengobatan tradisional – Canva.com*





### 3. Aplikasi dan Pemanfaatan Radiasi Gelombang Elektromagnetik

Pernahkah kamu berpikir bagaimana sinyal ponsel bisa sampai ke tanganmu, atau bagaimana dokter dapat melihat bagian dalam tubuh tanpa membuka kulit? Semua itu ada hubungannya dengan gelombang elektromagnetik.

Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang membawa energi melalui ruang. Mereka tidak membutuhkan medium (seperti udara atau air) untuk bergerak, jadi mereka bisa "terbang" melintasi ruang angkasa. Ada berbagai jenis gelombang elektromagnetik, dan masing-masing punya fungsi yang berbeda, bahkan yang kamu mungkin tidak sadari.



*Gelombang radio yang ada pada radio untuk menentukan channel siaran radio – Canva.com*

#### Gelombang Radio

Gelombang radio digunakan sebagai media komunikasi dan penyampai informasi dari satu tempat ke tempat lain, dengan frekuensi kurang dari  $10^9$  Hz. Terdapat dua jenis utama gelombang radio:

##### a. Gelombang Radio AM (Amplitudo Modulation)

Membawa informasi dengan frekuensi tetap namun amplitudo berubah-ubah. Daerah jangkauannya luas karena dapat dipantulkan oleh lapisan ionosfer. Namun, AM rentan terhadap gangguan listrik di udara, terutama saat terjadi petir. Sifat gelombang MF (Medium Frequency) dan HF (High Frequency) yang dipantulkan oleh ionosfer dimanfaatkan untuk komunikasi jarak jauh.

##### b. Gelombang Radio FM (Frequency Modulation)

Membawa informasi dengan amplitudo tetap tetapi frekuensi berubah-ubah. Gelombang FM dapat menembus ionosfer sehingga jangkauannya lebih pendek dibanding AM. FM lebih tahan terhadap gangguan listrik udara. Untuk memperluas jangkauan, digunakan stasiun pemancar ulang (relay) atau satelit.



## Gelombang Mikro (Microwave)

Gelombang mikro memiliki frekuensi antara  $10^9$  hingga  $10^{11}$  Hz, dan penggunaannya sangat beragam. Salah satunya adalah oven microwave yang digunakan untuk memasak makanan dengan memanaskan molekul air dalam makanan. Selain itu, gelombang mikro juga digunakan dalam analisis struktur atom dan molekul, serta mengukur kedalaman laut. Di dunia komunikasi, gelombang mikro mendukung sistem televisi dan radar (Radio Detection and Ranging) untuk mendeteksi objek. Untuk mengukur kedalaman laut dengan radar, digunakan rumus:

$$s = \frac{v \times t}{2}$$

dimana  $s$  adalah kedalaman laut,  $v$  adalah kecepatan radar dalam air, dan  $t$  adalah waktu bolak-balik gelombang radar. Kecepatan radar di udara dan air juga saling terkait dengan hubungan:

$$n_u \times c = n_a \times v$$

dimana  $n_u$  adalah indeks bias udara,  $c$  adalah kecepatan radar di udara,  $n_a$  adalah indeks bias air, dan  $v$  adalah kecepatan radar di air.

## Sinar Inframerah (Infrared)



Sinar inframerah untuk facial treatment – Canva.com

Gelombang inframerah memiliki frekuensi antara  $10^{13}$  hingga  $10^{14}$  Hz dan berasal dari getaran atom. Pemanfaatannya termasuk alat spektroskopi molekul, remote control untuk perangkat elektronik seperti TV dan AC, serta terapi kesehatan untuk mengurangi nyeri sendi, melancarkan sirkulasi darah, dan detoksifikasi tubuh. Gelombang inframerah juga digunakan dalam penyembuhan penyakit tertentu dan dalam gelang kesehatan untuk terapi alternatif.

## Cahaya Tampak (Visible Light)

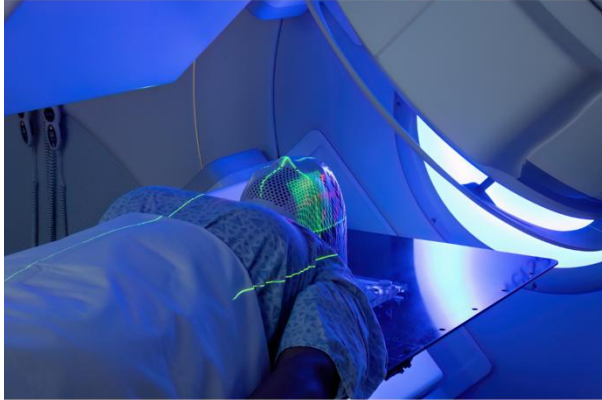
Cahaya tampak adalah satu-satunya gelombang elektromagnetik yang dapat dilihat oleh mata manusia, dengan frekuensi antara  $10^{14}$  hingga  $10^{15}$  Hz. Pemanfaatannya mencakup sumber cahaya untuk penglihatan, pembuatan sinar laser untuk industri dan medis, serta tampilan visual pada layar perangkat seperti TV, laptop, dan handphone. Laser pointer dan pemotongan logam juga memanfaatkan cahaya tampak. Spektrum cahaya tampak terdiri dari warna-warna merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila, dan ungu, dengan merah memiliki panjang gelombang terpanjang dan ungu terpendek.

## Sinar Ultraviolet (UV)

Gelombang UV memiliki frekuensi antara  $10^{15}$  hingga  $10^{17}$  Hz, dan tidak dapat dilihat oleh mata manusia. Pemanfaatan sinar UV meliputi sterilisasi udara, pemeriksaan keaslian uang, serta produksi vitamin D dalam tubuh. Sinar UV juga digunakan dalam terapi kesehatan dan disinfeksi virus, serta membunuh bakteri dan jamur. Selain itu, sinar UV digunakan untuk pemutihan bahan dan pengerasan resin. Jenis sinar UV meliputi UVA dan UVB yang mencapai permukaan Bumi, serta UVC yang memiliki daya tembus tinggi tetapi tidak sampai ke Bumi karena diserap atmosfer.

## Sinar-X (X-rays)

Dengan frekuensi antara  $10^{17}$  hingga  $10^{20}$  Hz, sinar-X sangat penting dalam dunia medis untuk melakukan foto rontgen guna memeriksa tulang dan organ tubuh. Sinar-X juga digunakan dalam deteksi keretakan logam, pemindaian barang di bandara, analisis struktur kristal, dan penentuan letak atom. Sinar-X dihasilkan dengan menembakkan elektron berkecepatan tinggi ke logam target dalam tabung vakum.



Pengobatan kemoterapi dengan radioterapi memakai energi sinar gamma – Canva.com

## Sinar Gamma (Gamma Rays)

Sinar gamma memiliki frekuensi lebih dari  $10^{20}$  Hz dan energi tertinggi di antara semua jenis gelombang elektromagnetik. Pemanfaatannya mencakup terapi kanker (radioterapi), sterilisasi peralatan medis, serta untuk mendeteksi kerusakan mesin industri dan rekayasa genetika. Sinar gamma juga digunakan untuk mengetahui kebocoran pipa dan gamma scanning dalam kontrol kualitas produksi. Sinar gamma dihasilkan melalui reaksi nuklir, peluruhan radioaktif, serta peristiwa kosmik seperti supernova.

### Contoh Soal

Jelaskan perbedaan pemanfaatan gelombang radio AM dan FM dalam komunikasi, serta sebutkan kelebihan dan kekurangan masing-masing!

#### Pembahasan

Gelombang radio **AM (Amplitudo Modulation)** membawa informasi dengan amplitudo yang berubah-ubah, sedangkan frekuensinya tetap. Gelombang AM memiliki **jangkauan luas** karena dapat dipantulkan oleh ionosfer sehingga cocok untuk komunikasi jarak jauh. Namun, AM sangat **rentan terhadap gangguan listrik di udara**, seperti saat terjadi petir.

Sebaliknya, gelombang radio **FM (Frequency Modulation)** membawa informasi dengan frekuensi yang berubah-ubah, sedangkan amplitudonya tetap. FM memiliki kualitas suara yang **lebih jernih** dan **tahan terhadap gangguan listrik udara**. Akan tetapi, FM memiliki **jangkauan yang lebih pendek** karena tidak dapat dipantulkan oleh ionosfer, sehingga membutuhkan relay atau satelit untuk memperluas jangkauannya.

Dengan demikian, **AM unggul dalam jangkauan luas**, sementara **FM unggul dalam kualitas suara**.



### Fakta Fisika di Sekitarmu

#### Sinar Matahari untuk Bayi

Tahukah kamu bahwa sinar matahari sangat penting untuk kesehatan bayi? Paparan sinar matahari pagi dapat membantu bayi memproduksi vitamin D yang diperlukan untuk pertumbuhan tulang yang kuat. Namun, pastikan paparan sinar matahari dilakukan dengan hati-hati, karena kulit bayi sangat sensitif dan rentan terhadap kerusakan akibat sinar UV.



Berjemur bagus untuk bayi – Canva.com



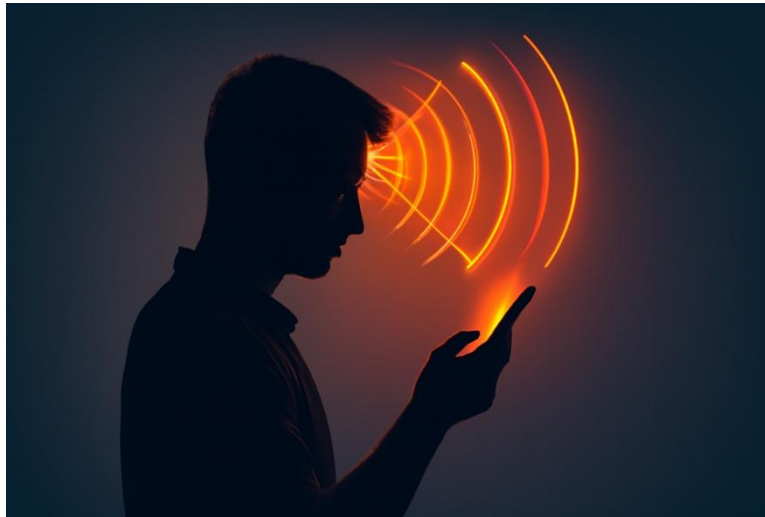
## 4. Risiko dan Dampak Negatif Radiasi Gelombang Elektromagnetik

Walaupun radiasi gelombang elektromagnetik memiliki banyak manfaat bagi kehidupan, penggunaannya yang berlebihan atau paparan yang tidak terkontrol dapat menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia maupun lingkungan.

### Bahaya dari Gelombang Frekuensi Rendah dan Menengah

#### a. Gelombang Mikro

Paparan gelombang mikro yang dipancarkan oleh handphone atau perangkat elektronik lainnya dalam jangka waktu lama dapat menimbulkan kelelahan pada mata, sakit kepala, dan mengacaukan sinyal di otak. Paparan berlebihan juga berpotensi memicu stres serta memengaruhi sistem saraf.



*Seseorang sedang menggunakan ponsel dalam waktu lama terpapar radiasi pada handphonenya – Gambar Ilustrasi Penerbit*

#### b. Sinar Inframerah

Paparan inframerah yang berlebihan, terutama pada intensitas tinggi, dapat menyebabkan kerusakan pada mata (seperti katarak) dan kulit (seperti penuaan dini atau luka bakar ringan).

### Bahaya dari Gelombang Elektromagnetik Pengion

Gelombang elektromagnetik berfrekuensi tinggi seperti **ultraviolet (UV)**, **sinar-X**, dan **sinar gamma** termasuk dalam kategori radiasi pengion, yang memiliki energi cukup untuk melepaskan elektron dari atom atau molekul. Efek negatifnya lebih berbahaya karena dapat merusak jaringan biologis secara langsung.

#### a. Sinar Ultraviolet (UV)

- ▷ Sumber utama adalah Matahari. Normalnya, lapisan ozon di atmosfer menyerap sebagian besar radiasi UV. Namun, penipisan lapisan ozon akibat polusi (misalnya penggunaan freon) membuat radiasi UV yang berbahaya mencapai permukaan Bumi.
- ▷ Dampak Kesehatan: bisa mengakibatkan kanker kulit, katarak pada mata dan penurunan kekebalan tubuh
- ▷ Dampak lingkungan: Dalam pertanian, radiasi UV berlebih dapat menyebabkan **hujan asam**, yang menghambat pertumbuhan tanaman dan merusak ekosistem.



*Berikut adalah ilustrasi seseorang dengan kulit yang terkena kanker kulit akibat paparan UV. – Gambar Ilustrasi Penerbit*

### b. Sinar-X

- ▷ Paparan sinar-X yang berlebihan, misalnya dari prosedur medis tanpa pengawasan, dapat merusak sel dan jaringan tubuh.
- ▷ Gejala paparan akut meliputi mual, muntah, diare, pendarahan, hingga sindrom radiasi akut.
- ▷ Paparan jangka panjang meningkatkan risiko kanker dan kerusakan genetik.



### c. Sinar Gamma

- ▷ Memiliki energi tertinggi di antara semua gelombang elektromagnetik.
- ▷ Paparan berlebihan dapat menimbulkan kanker, sindrom radiasi akut, bahkan **mutasi genetik**.
- ▷ Karena daya tembusnya yang sangat tinggi, radiasi gamma hanya boleh digunakan dalam lingkungan terkontrol seperti rumah sakit (untuk terapi kanker) atau industri (untuk pemeriksaan material).

Berikut adalah ilustrasi mesin rontgen di rumah sakit dengan teknisi yang mengenakan pelindung timbal, serta representasi visual efek radiasi sinar-X pada sel tubuh. – Gambar Ilustrasi Penerbit

## Langkah Pencegahan

Untuk meminimalkan risiko akibat radiasi gelombang elektromagnetik:

- Batasi waktu penggunaan perangkat elektronik yang memancarkan radiasi.
- Gunakan pelindung radiasi sesuai standar keselamatan, seperti **tabir surya** untuk mengurangi paparan UV dan **perisai timbal** saat melakukan pemeriksaan sinar-X.
- Terapkan prosedur keamanan di fasilitas medis dan industri yang menggunakan radiasi pengion.
- Lakukan pemeriksaan kesehatan rutin bagi pekerja yang terpapar radiasi tinggi.

### Contoh Soal

Mengapa sinar ultraviolet (UV) termasuk dalam radiasi elektromagnetik pengion yang berbahaya bagi kesehatan manusia, dan sebutkan contoh dampak negatifnya pada tubuh manusia?

#### Pembahasan

Sinar ultraviolet (UV) termasuk dalam radiasi elektromagnetik pengion karena memiliki **energi yang cukup besar** untuk melepaskan elektron dari atom atau molekul dalam tubuh. Proses ini dapat merusak struktur sel, jaringan, bahkan DNA, sehingga efeknya lebih berbahaya dibanding radiasi non-pengion.

Contoh dampak negatif sinar UV pada tubuh manusia antara lain:

- Kanker kulit** akibat kerusakan DNA pada sel kulit.
- Katarak pada mata**, yang mengakibatkan gangguan penglihatan.
- Penurunan sistem kekebalan tubuh**, sehingga tubuh lebih rentan terhadap penyakit.

Oleh karena itu, paparan sinar UV perlu dibatasi dengan langkah pencegahan, misalnya menggunakan tabir surya, pakaian pelindung, atau kacamata khusus saat beraktivitas di bawah sinar matahari dalam waktu lama.



## Kegiatan Praktikum

**Judul Kegiatan:** Menganalisis Pemanfaatan Gelombang Elektromagnetik dalam Kehidupan Sehari-hari

**Tujuan:**

- Mengidentifikasi benda-benda yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik.
- Menjelaskan manfaat dan bahaya dari penggunaan gelombang elektromagnetik tersebut.

**Petunjuk Kegiatan:**

**Bentuk Kelompok:** Buatlah kelompok yang terdiri dari **4-5 orang**.

### Langkah 1: Identifikasi dan Penjelasan

Amati gambar-gambar berikut dan identifikasi benda-benda yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik. Jelaskan jenis gelombang elektromagnetik yang digunakan dalam setiap benda.

**Gambar yang perlu dianalisis:**

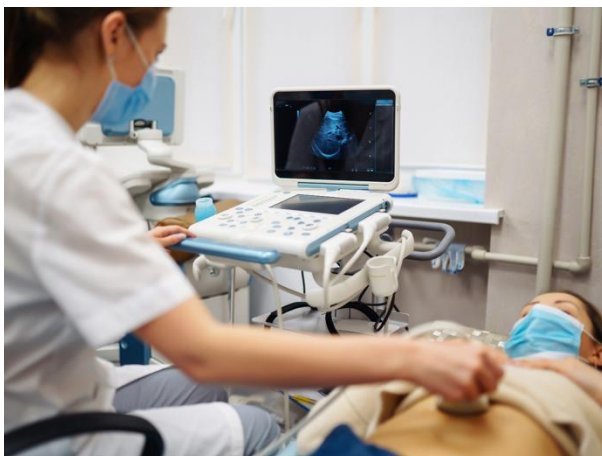
(Gambar a)



(Gambar b)



(Gambar c)



(Gambar d)



**Petunjuk:**

Gunakan **gambar a** dan **gambar b** untuk menunjukkan penggunaan gelombang elektromagnetik dalam perangkat yang ada di kehidupan sehari-hari.

**Langkah 2: Analisis Bahaya**

Setelah mengidentifikasi benda-benda tersebut, diskusikan bahaya dari gelombang elektromagnetik yang digunakan. Apa saja risiko atau dampak negatif yang mungkin ditimbulkan?

Bahas tentang potensi paparan radiasi dari sinar x, risiko gelombang radio, dan bahaya penggunaan gelombang elektromagnetik lainnya.

**Langkah 3: Pencarian Sumber**

Setiap anggota kelompok mencari informasi dari sumber yang berbeda (buku, artikel ilmiah, atau sumber digital terpercaya) tentang penggunaan gelombang elektromagnetik. Pastikan informasi yang ditemukan relevan dengan benda yang sedang dianalisis.

**Langkah 4: Presentasi Kelompok**

Susun presentasi PowerPoint berdasarkan hasil diskusi kelompok, yang mencakup:

- 1) Identifikasi benda dan jenis gelombang elektromagnetik yang digunakan.
- 2) Analisis bahaya dari penggunaan gelombang elektromagnetik.
- 3) Gunakan gambar yang relevan untuk mendukung penjelasan.

**Langkah 5: Diskusi Kelas**

Setiap kelompok akan mempresentasikan hasil analisisnya di depan kelas. Diskusikan dengan teman-teman kelompok lain mengenai cara-cara mengurangi bahaya dari penggunaan gelombang elektromagnetik ini.

Penilaian:

- 1) **Kreativitas dalam Presentasi:** Penggunaan gambar yang tepat dan penjelasan yang jelas.
- 2) **Pemahaman Materi:** Seberapa baik kelompok bisa menjelaskan jenis gelombang elektromagnetik dan bahaya yang ditimbulkan.
- 3) **Kolaborasi Kelompok:** Setiap anggota aktif berkontribusi dalam diskusi dan presentasi.

## Rangkuman

- 1) **Spektrum Gelombang Elektromagnetik:** Gelombang elektromagnetik bergerak dengan kecepatan cahaya ( $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) di ruang hampa.
- 2) **Pemikiran Maxwell tentang Gelombang Elektromagnetik:** Maxwell merumuskan interaksi medan listrik dan magnet yang menghasilkan gelombang elektromagnetik.
- 3) **Perambatan Gelombang Elektromagnetik:** Gelombang elektromagnetik adalah gelombang transversal, dimana medan listrik (E) dan medan magnet (B) bergetar tegak lurus terhadap arah rambatnya.
- 4) **Sifat Gelombang Elektromagnetik:**
  - ▷ Kecepatan gelombang elektromagnetik di ruang hampa:  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ .
  - ▷ Dimana  $c$  adalah kecepatan cahaya,  $\mu_0$  adalah permeabilitas ruang hampa, dan  $\epsilon_0$  adalah permitivitas ruang hampa.
- 5) **Hubungan Kecepatan, Frekuensi, dan Panjang Gelombang:**
  - ▷ Hubungan antara kecepatan  $c$ , frekuensi  $f$ , dan panjang gelombang  $\lambda$ :  $c = f\lambda$
  - ▷ Semakin tinggi frekuensi, semakin pendek panjang gelombang.
- 6) **Rangkaian Jenis Gelombang Elektromagnetik:** Urutan gelombang elektromagnetik berdasarkan panjang gelombang dan frekuensi:  
Gelombang Radio  $< 10^9 \text{ Hz}$  hingga Sinar Gamma  $> 10^{20} \text{ Hz}$ .
- 7) **Asal dan Sumber Radiasi Gelombang Elektromagnetik:** Sumber alami (misalnya sinar matahari) dan sumber buatan manusia (misalnya sinar-X medis).
- 8) **Bahaya Radiasi Gelombang Elektromagnetik:** Gelombang dengan frekuensi tinggi (seperti sinar-X dan gamma) dapat merusak jaringan tubuh, memicu kanker dan mutasi genetik.
- 9) **Langkah Pencegahan Radiasi Gelombang Elektromagnetik:** Gunakan pelindung radiasi seperti tabir surya dan pelindung timbal.



## Latihan Soal

1. Jika sinar ultraviolet, sinar biru, dan sinar-X masing-masing ditandai dengan P, Q, dan R; urutan yang menunjukkan panjang gelombang yang makin besar adalah...
  - A. P, Q, dan R
  - B. Q, P, dan R
  - C. R, P, dan Q
  - D. R, Q, dan P
  - E. P, R, dan Q
2. (HOTS) Medan listrik dalam sebuah gelombang elektromagnetik dinyatakan dengan persamaan  $E = 150\sin(200\pi x + 20\pi t)$  N/C, dengan x dalam meter dan t dalam detik. Panjang gelombang elektromagnetik tersebut adalah...
  - A. 10 mm
  - B. 0.5 mm
  - C. 2 cm
  - D. 10 cm
  - E. 1 mm
3. Perhatikan pernyataan berikut.
  - 1) Dapat mengalami polarisasi.
  - 2) Merupakan gelombang transversal.
  - 3) Merambat dalam medan magnetik dan medan listrik.
  - 4) Terdiri atas partikel bermuatan listrik.Pernyataan yang menyatakan sifat gelombang elektromagnetik ditunjukkan oleh nomor...
  - A. (1) dan (2)
  - B. (2) dan (3)
  - C. (3) dan (3)
  - D. (4) dan (4)
  - E. (5) dan (4)
4. Gelombang elektromagnetik memiliki persamaan gelombang berjalan  $B_x = 10^{-7}\sin(5 \times 10^{-6}x - 900t)$  T. Besar amplitudo medan listrik gelombang elektromagnetik tersebut adalah...
  - A. 20 V/m
  - B. 30 V/m
  - C. 50 V/m
  - D. 300 V/m
  - E. 600 V/m
5. Berikut ini yang bukan gelombang elektromagnetik adalah...
  - A. Gelombang TV
  - B. Sinar gamma

- C. Cahaya tampak
  - D. Sinar-X
  - E. Gelombang radio
6. Perhatikan kondisi berikut.
- 1) Kanker kulit
  - 2) Kerusakan mata
  - 3) Penurunan sistem kekebalan tubuh
  - 4) Gangguan pernapasan
  - 5) Gangguan sel
- Kondisi yang dapat terjadi akibat adanya radiasi sinar ultraviolet bagi kehidupan manusia ditunjukkan oleh nomor...
- A. (1), (2), dan (5)
  - B. (1), (3), dan (4)
  - C. (2), (3), dan (5)
  - D. (1), (4), dan (5)
  - E. (2), (4), dan (5)
7. (HOTS) Stasiun radar mengirimkan sinyal terhadap objek yang bergerak di wilayah Indonesia. Selang waktu antara pengiriman dengan penerimaan kembali sinyal tersebut adalah 0,5 ms. Jarak objek saat itu dengan stasiun radar adalah...
- A. 500 km
  - B. 250 km
  - C. 100 km
  - D. 50 km
  - E. 200 km

Akses latihan soal  
lainnya di sini yuk!



Latihan Soal Fisika  
Kelas 12 BAB 5

## Referensi

Wikipedia contributors. (n.d.). Gelombang elektromagnetik. Wikipedia, Ensiklopedia Bebas. Diakses pada 30 Juli 2025, dari ([https://id.wikipedia.org/wiki/Gelombang\\_elektromagnetik](https://id.wikipedia.org/wiki/Gelombang_elektromagnetik))

Wikipedia contributors. (n.d.). Spektrum elektromagnetik. Wikipedia, Ensiklopedia Bebas. Diakses pada 30 Juli 2025, dari ([https://id.wikipedia.org/wiki/Spektrum\\_elektronmagnetik](https://id.wikipedia.org/wiki/Spektrum_elektronmagnetik))

Wikipedia contributors. (n.d.). Sinar-X. Wikipedia, Ensiklopedia Bebas. Diakses pada 30 Juli 2025, dari (<https://id.wikipedia.org/wiki/Sinar-X>)

Wikipedia contributors. (n.d.). Maxwell, James Clerk. Wikipedia, Ensiklopedia Bebas. Diakses pada 30 Juli 2025, dari ([https://id.wikipedia.org/wiki/James\\_Clerk\\_Maxwell](https://id.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell))

Wikipedia contributors. (n.d.). Radiasi pengion. Wikipedia, Ensiklopedia Bebas. Diakses pada 30 Juli 2025, dari ([https://id.wikipedia.org/wiki/Radiasi\\_pengion](https://id.wikipedia.org/wiki/Radiasi_pengion))

Wikipedia contributors. (n.d.). Medan listrik. Wikipedia, Ensiklopedia Bebas. Diakses pada 30 Juli 2025, dari ([https://id.wikipedia.org/wiki/Medan\\_listrik](https://id.wikipedia.org/wiki/Medan_listrik))

Wikipedia contributors. (n.d.). Medan magnet. Wikipedia, Ensiklopedia Bebas. Diakses pada 30 Juli 2025, dari ([https://id.wikipedia.org/wiki/Medan\\_magnet](https://id.wikipedia.org/wiki/Medan_magnet))

Wikipedia contributors. (n.d.). Hertz, Heinrich Rudolf. Wikipedia, Ensiklopedia Bebas. Diakses pada 30 Juli 2025, dari ([https://id.wikipedia.org/wiki/Heinrich\\_Rudolf\\_Hertz](https://id.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Rudolf_Hertz))

Wikipedia contributors. (n.d.). Sinar ultraviolet. Wikipedia, Ensiklopedia Bebas. Diakses pada 30 Juli 2025, dari ([https://id.wikipedia.org/wiki/Sinar\\_ultraviolet](https://id.wikipedia.org/wiki/Sinar_ultraviolet))

A hand is shown drawing the equation  $E=mc^2$  on a dark chalkboard with white chalk. The equation is written in a large, slightly rough, hand-drawn style. Below the equation, a horizontal line is drawn with a yellow chalk. The hand is holding a yellow chalk stick and is positioned to the right of the equation.
$$E=mc^2$$

## BAB 6: PEMAHAMAN TEORI RELATIVITAS KHUSUS

### Karakter Pelajar Pancasila

**Bergotong Royong:** Bekerja sama memahami fenomena gerak relativistik.

**Bernalar Kritis:** Menganalisis bukti ilmiah teori relativitas.

**Kreatif:** Mengembangkan ide penerapan relativitas dalam teknologi.

**Kata Kunci:** Michelson–Morley, Hipotesis eter, Kerangka acuan, Transformasi Lorentz, Transformasi Galileo, Postulat Einstein, Dilatasi waktu, Kontraksi Panjang, Kesetaraan massa–energi

**Tujuan Pembelajaran: Memahami Teori Relativitas Khusus**

### 1. Menjelaskan percobaan Michelson-Morley dalam membuktikan ketiadaan eter

- ▷ Menguraikan tujuan dan hasil percobaan Michelson-Morley.
- ▷ Menjelaskan dampak percobaan ini terhadap lahirnya teori relativitas Einstein.

### 2. Mendeskripsikan kerangka acuan inersia, transformasi Lorentz, dan konsekuensinya

- ▷ Menjelaskan perbedaan kerangka acuan inersia dan non-inersia.
- ▷ Menguraikan hubungan transformasi Lorentz dengan postulat Einstein.

### 3. Mengidentifikasi penerapan teori relativitas khusus Einstein

- ▷ Menjelaskan konsep relativitas dalam kehidupan sehari-hari dan teknologi.
- ▷ Memberikan contoh penerapan praktis teori relativitas dalam sains modern.

**4. Menganalisis perubahan panjang, waktu, dan massa dalam kerangka acuan relativistik**

- ▷ Menguraikan konsep dilatasi waktu dan kontraksi panjang.
- ▷ Menjelaskan kesetaraan massa-energi berdasarkan teori relativitas.

**5. Menjelaskan konsep relativitas tentang panjang, waktu, massa, dan energi**

- ▷ Menguraikan keterkaitan massa, energi, dan kecepatan cahaya.
- ▷ Menjelaskan rumus  $E = mc^2$  sebagai dasar kesetaraan massa-energi.

**6. Menganalisis pengaruh gerak relativistik terhadap momentum dan energi**

- ▷ Menjelaskan perbedaan momentum klasik dan momentum relativistik.
- ▷ Menguraikan energi kinetik dalam konteks relativistik.



F I T R I



## 1. Postulat Relativitas

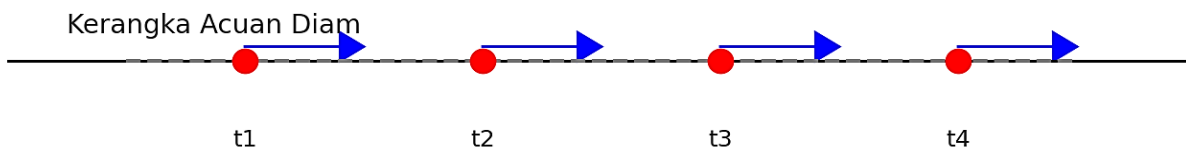
Bayangkan kalian sedang berada di dalam kereta yang bergerak dengan kecepatan tinggi. Ketika melihat keluar jendela, kalian melihat pohon-pohon dan rumah-rumah yang tampak bergerak menjauh. Namun, apakah kalian tahu bahwa bagi orang yang berdiri di luar kereta, kalian yang sebenarnya sedang bergerak? Nah, apa yang sebenarnya terjadi di sini? Kenapa perbedaan pandangan bisa terjadi?

Di sini, kita akan mempelajari dua postulat dasar dalam teori relativitas yang dikemukakan oleh Albert Einstein. Postulat pertama mengatakan bahwa hukum fisika itu sama di semua kerangka acuan yang tidak bergerak atau bergerak dengan kecepatan tetap. Sementara itu, postulat kedua menjelaskan bahwa kecepatan cahaya selalu tetap, tak peduli seberapa cepat pengamat atau sumber cahaya itu bergerak. Penasaran bagaimana hal ini bisa mengubah cara kita melihat dunia? Yuk, kita pelajari bersama!

### Teori Relativitas Newton

Teori relativitas Newton menjelaskan gerak suatu benda yang kecepatannya jauh lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan cahaya. Berdasarkan teori ini, suatu benda dikatakan diam jika posisinya tidak berubah terhadap kerangka acuan yang lebih besar. Sebaliknya, suatu benda dikatakan bergerak jika posisinya berubah dalam kerangka acuan tersebut. Hukum Newton, atau hukum inersia, menyatakan bahwa jika suatu benda yang diam tidak mengalami hasil gaya yang bekerja, benda tersebut akan tetap diam atau bergerak dengan kecepatan konstan. Dengan kata lain, apabila tidak ada gaya luar yang bekerja, objek akan tetap berada dalam keadaan awalnya, apakah diam atau bergerak dengan kecepatan tetap.

### Ilustrasi Kerangka Acuan Inersia Objek Bergerak dengan Kecepatan Konstan



*Ilustrasi kerangka acuan inersia yang menunjukkan objek bergerak dengan kecepatan konstan dalam suatu ruang yang diam.– Gambar Ilustrasi Penerbit*

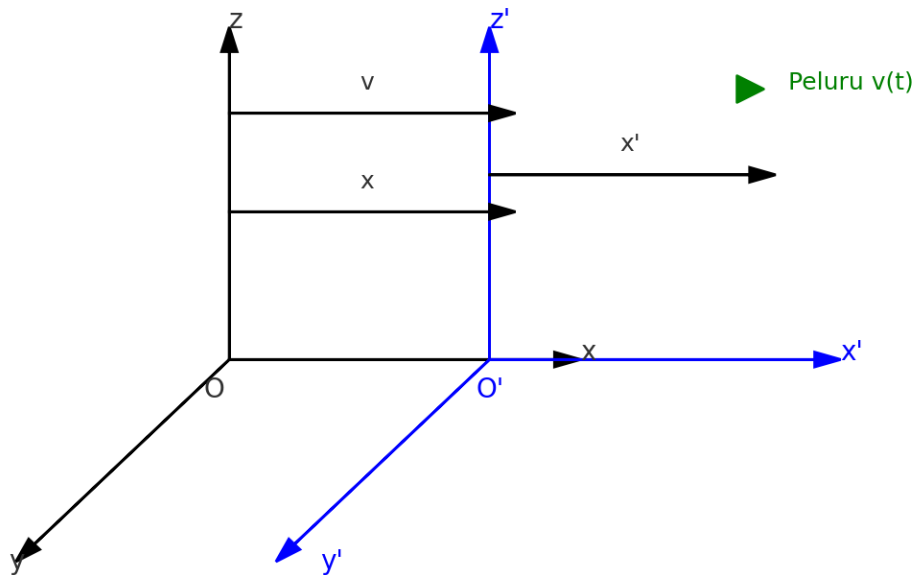
Ketika kerangka acuan berlaku sesuai dengan hukum Newton, kerangka acuan ini disebut **kerangka acuan inersia**. Dalam konteks dua kerangka acuan inersia yang bergerak satu sama lain dengan kecepatan konstan, kita tidak bisa membedakan mana yang diam dan mana yang bergerak.



## Transformasi Galileo

Transformasi Galileo adalah perubahan koordinat yang digunakan untuk menjelaskan hubungan antara dua kerangka acuan inersia yang bergerak relatif satu sama lain. Jika dua pengamat memutuskan untuk mengukur suatu objek dengan hukum fisika yang sama, maka mereka akan mendapatkan hasil yang sama meskipun sistem koordinatnya berbeda. Hukum fisika yang berlaku dalam transformasi ini disebut hukum fisika invarian, yang berarti bahwa hukum fisika tetap tidak berubah meskipun kerangka acuan berbeda.

### Transformasi Galileo (Dua Kerangka Acuan Inersia)



*Ilustrasi transformasi Galileo yang menggambarkan perubahan posisi suatu objek dalam dua kerangka acuan yang bergerak relatif satu sama lain. – Gambar Ilustrasi Penerbit*

Menurut hukum Newton, sistem koordinat yang digunakan untuk mengukur gerak relatif ini disebut **kerangka acuan inersia**. Jika dua kerangka acuan inersia bergerak satu sama lain dengan kecepatan konstan, maka pergerakan antara keduanya akan selalu memenuhi persamaan berikut:

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$



Dimana:

$x', y', z'$  adalah posisi pada kerangka acuan yang bergerak.

$v$  adalah kecepatan relatif antara kedua kerangka acuan.

$x, y, z$  adalah posisi pada kerangka acuan yang diam.

$t$  adalah waktu yang tetap pada kedua kerangka acuan.

Jika kerangka acuan  $O'$  bergerak relatif terhadap kerangka  $O$  dengan kecepatan  $v$  sepanjang sumbu- $x$ , maka persamaan transformasi Galileo dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned}x &= x' + vt \\y &= y' \\z &= z' \\t &= t'\end{aligned}$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa:

**Koordinat ruang pada sumbu- $x$**  berbeda antar pengamat karena bergantung pada kecepatan relatif  $v$ .

**Koordinat sumbu  $y$  dan  $z$**  tidak berubah karena gerakan relatif hanya terjadi pada sumbu- $x$ .

Waktu dianggap absolut, artinya  $t = t'$ . Semua pengamat, baik di  $O$  maupun  $O'$ , mengukur waktu yang sama.

Dari transformasi Galileo, kecepatan benda di sumbu- $x$  menurut pengamat di kerangka  $O$  dinyatakan sebagai:

$$v'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{d(x - vt)}{dt} = \frac{dx}{dt} - v$$

Sehingga berlaku:

$$v'_x = v_x - v$$

Artinya, kecepatan relatif suatu benda berkurang sebesar kecepatan kerangka acuan.

Jika sebuah peluru bergerak dengan kecepatan  $v_x = 100$  m/s menurut pengamat diam  $O$ , dan kerangka  $O'$  bergerak ke arah sama dengan kecepatan  $v = 20$  m/s, maka menurut pengamat di  $O'$  kecepatan peluru adalah:

$$v'_x = 100 - 20 = 80 \text{ m/s}$$

Dari transformasi Galileo, kita sudah tahu bahwa kecepatan benda di dua kerangka acuan berbeda:

$$v'_x = v_x - v$$

Kalau kita turunkan terhadap waktu untuk mencari percepatan:

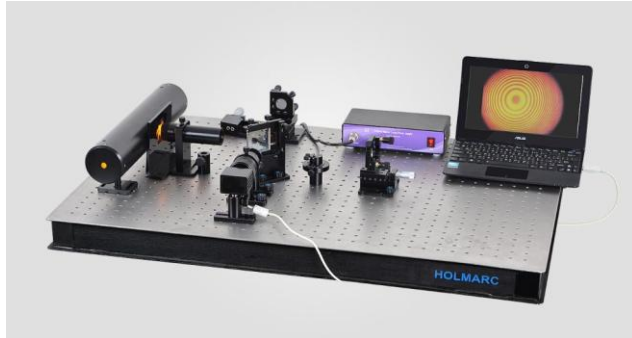
$$a'_x = \frac{dv'_x}{dt} = \frac{d(v_x - v)}{dt}$$

Karena  $v$  (kecepatan relatif antar kerangka) adalah konstan, turunan dari  $v$  sama dengan nol. Jadi:

$$a'_x = \frac{dv_x}{dt} = a_x$$

Dengan persamaan ini, kita dapat memahami bagaimana posisi, kecepatan, dan waktu dipengaruhi oleh kerangka acuan yang digunakan, dengan prinsip dasar bahwa gerakan relatif antara dua objek dapat dijelaskan tanpa mengubah hukum fisika yang berlaku.

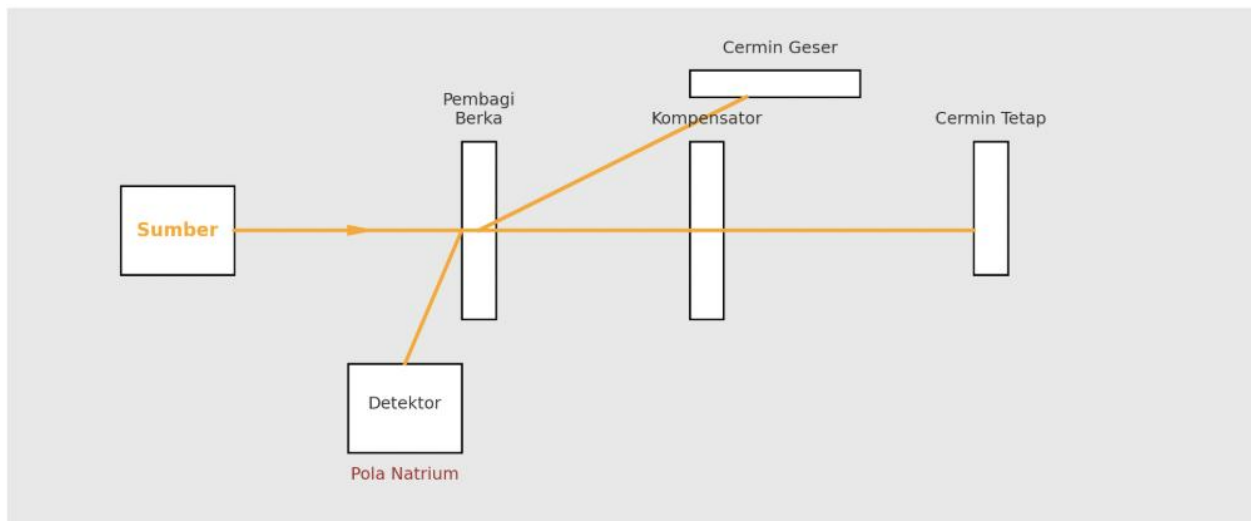
### Percobaan Michelson dan Morley



Alat interferometer– Canva.com

Percobaan Michelson-Morley adalah eksperimen yang berupaya mengukur kecepatan relatif cahaya terhadap medium yang disebut "eter". Eter ini sebelumnya dianggap sebagai medium perambatan gelombang cahaya, mirip dengan udara yang mengantarkan gelombang suara. Eksperimen ini bertujuan untuk mendeteksi perbedaan dalam kecepatan cahaya berdasarkan arah gerak Bumi terhadap eter.

Namun, hasil percobaan ini menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan kecepatan cahaya, meskipun Bumi bergerak melalui ruang angkasa. Hal ini menyimpulkan bahwa tidak ada medium eter yang diperlukan untuk perambatan cahaya. Oleh karena itu, hasil ini bertentangan dengan teori klasik yang menganggap bahwa eter adalah medium untuk gelombang cahaya. Hasil ini menunjukkan bahwa cahaya tidak memerlukan medium seperti eter untuk merambat.



Cara Kerja Alat interferometer– Gambar Ilustrasi Penerbit

Berdasarkan hasil percobaan tersebut, kecepatan cahaya terbukti konstan dan tidak tergantung pada gerakan benda apapun, termasuk gerakan Bumi dalam ruang. Ini menjadi dasar teori relativitas Einstein, yang mengemukakan bahwa kecepatan cahaya adalah tetap dalam segala kondisi pengamatan, baik dalam kerangka acuan yang bergerak maupun yang diam.

Untuk menghitung kecepatan cahaya, digunakan persamaan sebagai berikut:

$$v = \sqrt{c^2 - v'^2}$$

Dimana:

$v$  adalah kecepatan relatif antara dua pengamat.

$c$  adalah kecepatan cahaya dalam ruang hampa.

$v'$  adalah kecepatan objek yang bergerak terhadap pengamat.

Eksperimen ini berkontribusi besar terhadap perubahan besar dalam teori fisika, yang akhirnya melahirkan teori relativitas khusus Einstein.

### Contoh Soal

Dita berada di dalam kereta yang melaju lurus beraturan dengan kecepatan 25 m/s. Ia melihat Budi yang berdiri di peron stasiun. Delapan detik setelah kereta melewati Budi, Budi melihat sebuah taksi yang berada 600 m di depannya bergerak **searah** dengan laju konstan. Tujuh detik kemudian, posisi taksi yang sama menjadi 1,3 km di depan Budi. Tentukan:

- posisi taksi menurut Dita pada pengamatan pertama dan kedua;
- besar kecepatan taksi relatif terhadap Budi dan relatif terhadap Dita.

### Pembahasan

#### Diketahui:

$v = 25 \text{ m/s}$  (kecepatan kereta relatif terhadap Budi)

$$t_1 = 8 \text{ s}$$

$$x_1 = 600 \text{ m}$$

$$s_{t2} = 15 \text{ s} \times (8 \times \text{s} + 7 +)$$

$$x_2 = 1,3 \text{ km} = 1300 \text{ m}$$

#### Ditanya:

a.  $x'_1$  dan  $x'_2$ ?

b.  $v_x$  dan  $v'_x$ ?

#### a. Posisi taksi menurut Dita (kerangka kereta)

Gunakan transformasi Galileo 1D (arah sama):

$$x' = x - vt$$

▷ Pengamatan pertama:

$$x'_1 = x_1 - vt_1 = 600 - (25)(8) = 600 - 200 = 400 \text{ m}$$

▷ Pengamatan kedua:

$$x'_2 = x_2 - vt_2 = 1300 - (25)(15) = 1300 - 375 = 925 \text{ m}$$

Jadi, posisi taksi menurut Dita:  $x'_1 = 400 \text{ m}$  dan  $x'_2 = 925 \text{ m}$ .

#### b. Kecepatan relatif

Terhadap Budi (diam di peron):

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{1300 - 600}{15 - 8} = \frac{700}{7} = 100 \text{ m/s}$$

Terhadap Dita (di kereta):

$$v'_x = v_x - v = 100 - 25 = 75 \text{ m/s}$$

Jawaban akhir:

a.  $mx'_1 = 400 \text{ m}$ ,  $x'_2 = 925 \text{ m}$ .

b. Kecepatan taxi relatif terhadap Budi =100 m/s; relatif terhadap Dita =75 m/s.

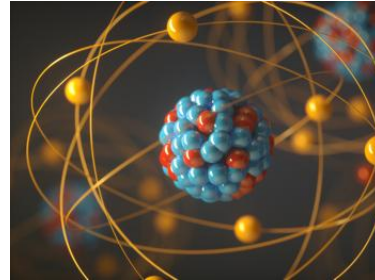
Catatan: Soal ini menggunakan kinematika klasik (kecepatan jauh lebih kecil dari  $c$ ), sehingga penjumlahan kecepatan cukup  $u' = u - v$  (nonrelativistik).



### Fakta Fisika di Sekitarmu

#### Partikel Kosmik yang “Bandel”

Tahukah kamu bahwa Muon dari luar angkasa seharusnya sudah habis sebelum sampai ke tanah. Tapi karena waktu mereka melambat (dilatasi waktu), mereka bisa “menipu” kematian dan tetap terdeteksi di Bumi!



Partikel Muon– Canva.com



## 2. Konsep Relativitas Khusus



*Pemakaian GPS pada mobil meruokan bukti nyata dari teori relativitas khusus – Canva.com*

Sebelum abad ke-20, hukum-hukum Newton menjadi dasar utama dalam fisika untuk menjelaskan berbagai fenomena alam. Menurut mekanika Newton, sebuah benda yang diberikan gaya terus-menerus akan terus mengalami percepatan tanpa batas, sehingga kecepatannya dapat mencapai tak terhingga. Namun, eksperimen-eksperimen seperti percobaan Michelson-Morley dan temuan Maxwell mengenai gelombang elektromagnetik menunjukkan bahwa anggapan ini tidak benar. Kecepatan maksimum yang dapat dicapai oleh benda ternyata memiliki batas, yaitu kecepatan cahaya.

Pada tahun 1905, **Albert Einstein** memperkenalkan sebuah teori yang merevolusi pemahaman kita tentang ruang dan waktu, yang dikenal dengan **Teori Relativitas Khusus**. Teori ini hanya berlaku pada kerangka acuan inersia (kerangka yang tidak mengalami percepatan) dan mengoreksi kelemahan mekanika Newton ketika kecepatan benda mendekati kecepatan cahaya.

### Dua Postulat Dasar Relativitas Khusus

Einstein merumuskan dua postulat utama sebagai landasan teori ini:

**a. Hukum-hukum fisika berlaku sama di semua kerangka inersia.**

Artinya, tidak ada kerangka acuan yang istimewa; semua hukum fisika berlaku identik.

▷ **Kecepatan cahaya di ruang hampa selalu konstan.**

Nilainya adalah

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

dan tidak bergantung pada gerak sumber cahaya maupun gerak pengamat.

### Konsekuensi Postulat Relativitas Khusus

Berdasarkan kedua postulat ini, ruang dan waktu bersifat relatif. Panjang, waktu, dan massa tidak lagi absolut, tetapi bergantung pada kerangka acuan pengamat. Untuk menjelaskan hubungan antara posisi dan waktu pada dua kerangka acuan yang bergerak relatif, digunakan **Transformasi Lorentz**.

## Transformasi Lorentz

Misalkan terdapat dua pengamat,  $O$  dan  $O'$ , yang masing-masing memiliki kerangka acuan  $(x, y, z)$  dan  $(x', y', z')$ . Pada saat  $t = 0$ , posisi  $O$  dan  $O'$  berimpit. Kemudian  $O'$  bergerak ke kanan sepanjang sumbu- $X$  dengan kecepatan  $v$  mendekati kecepatan cahaya.

Menurut Einstein, posisi dan waktu kejadian yang diukur oleh kedua pengamat tersebut akan berbeda. Hubungan ini dinyatakan melalui persamaan **transformasi Lorentz**:

$$x' = (x - vt)$$

$$t' = \left( t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

dengan

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Untuk arah sumbu lain:

$$y' = y \quad \text{dan} \quad z' = z$$

## Transformasi Invers

Jika kita ingin mengubah kembali dari kerangka  $O'$  ke  $O$ , maka digunakan:

$$x = (x' + vt')$$

$$t = \left( t' + \frac{vx'}{c^2} \right)$$

$$y = y' \quad \text{dan} \quad z = z'$$

## Kecepatan Relativistik

Jika sebuah benda memiliki kecepatan  $v'_x$  terhadap kerangka  $O'$ , dan kerangka  $O'$  bergerak terhadap kerangka  $O$  dengan kecepatan  $v$ , maka kecepatan benda menurut pengamat  $O$  diberikan oleh:

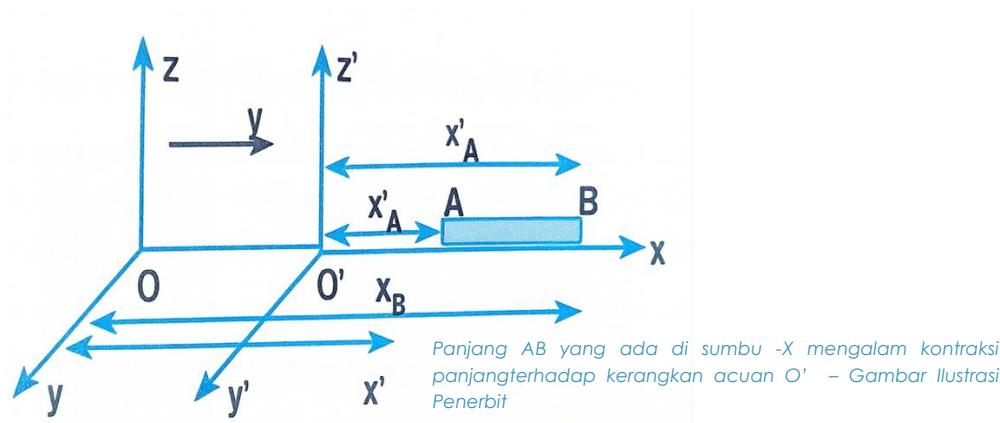
$$v_x = \frac{v'_x + v}{1 + \frac{v'_x v}{c^2}}$$

Untuk dua partikel yang bergerak sejajar mendekati kecepatan cahaya dengan kecepatan masing-masing  $v_1$  dan  $v_2$ , maka kecepatan relatif partikel 1 terhadap partikel 2 adalah:

$$v_{12} = \frac{v_1 - v_2}{1 - \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

## Kontraksi Panjang

Ketika sebuah benda diamati dari kerangka yang bergerak mendekati kecepatan cahaya, panjang benda tersebut akan tampak lebih pendek dibandingkan panjangnya ketika diam. Fenomena ini disebut **kontraksi panjang**.



Hubungan antara panjang sebenarnya ( $L_0$ ) dan panjang teramati ( $L$ ) adalah:

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Atau

$$L = \frac{L_0}{\gamma}$$

dengan:

$L_0$  = panjang benda pada kerangka diam,

$L$  = panjang benda yang diamati pada kerangka bergerak.

Karena  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$ , maka  $L < L_0$ .



## Dilatasi Waktu

Selain panjang, waktu juga relatif. Selang waktu yang diukur oleh pengamat bergerak ( $\Delta t'$ ) lebih lama dibandingkan dengan pengamat diam ( $\Delta t$ ). Fenomena ini disebut **dilatasi waktu**.

Hubungannya adalah:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Atau

$$\Delta t' = \gamma \Delta t$$

dengan:

$\Delta t$  = selang waktu menurut pengamat diam,

$\Delta t'$  = selang waktu menurut pengamat bergerak.

Karena  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$ , maka  $\Delta t' > \Delta t$ . Artinya, pengamat bergerak akan merasakan waktu berjalan lebih lambat dibanding pengamat diam.

Teori Relativitas Khusus mengubah pandangan kita bahwa ruang dan waktu bukanlah sesuatu yang absolut, tetapi bergantung pada gerak pengamat. Panjang benda dapat menyusut dan selang waktu dapat memanjang ketika benda mendekati kecepatan cahaya. Hukum Newton tetap berlaku pada kecepatan yang jauh lebih kecil dibanding kecepatan cahaya, tetapi memerlukan koreksi relativistik ketika kecepatan mendekati  $c$ .

### Contoh Soal

Jam di stasiun Bumi mencatat waktu 1 jam. Seorang astronot bergerak dengan kecepatan  $0,8c$  relatif terhadap Bumi. Berapa lama waktu menurut astronot?

**Pembahasan:**

$$\Delta t' = \gamma \Delta t$$

Dengan

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,8)^2}} = 1,667$$

$$\Delta t' = 1,667 \times 1 \text{ jam} = 1,667 \text{ jam} \approx 1 \text{ jam } 40 \text{ menit}$$

**Jawaban:**

Waktu menurut astronot adalah **1 jam 40 menit**.



## Fakta Fisika di Sekitarmu

### GPS dan Relativitas

Tahukah kamu Tanpa relativitas, peta di HP-mu bisa nyasar sampai 10 km per hari. Jam satelit GPS harus dikoreksi agar tetap sinkron dengan jam di Bumi!



*Gps pada Handphone- Canva.com*



### 3. Massa, Momentum, dan Energi dalam Relativitas

Pada kecepatan yang mendekati kecepatan cahaya, hukum-hukum Newton tidak lagi berlaku. Teori relativitas khusus yang diperkenalkan oleh Albert Einstein menjelaskan bagaimana massa, momentum, dan energi suatu benda berubah secara signifikan pada kecepatan tinggi. Konsep ini penting untuk memahami fenomena dalam fisika modern, termasuk partikel subatom dan reaksi nuklir.

#### Massa Relativistik

Dalam mekanika klasik, massa dianggap konstan. Namun, menurut relativitas, massa meningkat seiring kecepatan.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

#### Keterangan:

$m$  = massa relativistik

$m_0$  = massa diam

$v$  = kecepatan benda

$c$  = kecepatan cahaya

#### Momentum Relativistik

Momentum benda pada kecepatan mendekati cahaya dinyatakan **dengan**:

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

#### Dengan:

$p$  = momentum relativistic (kg.m/s)

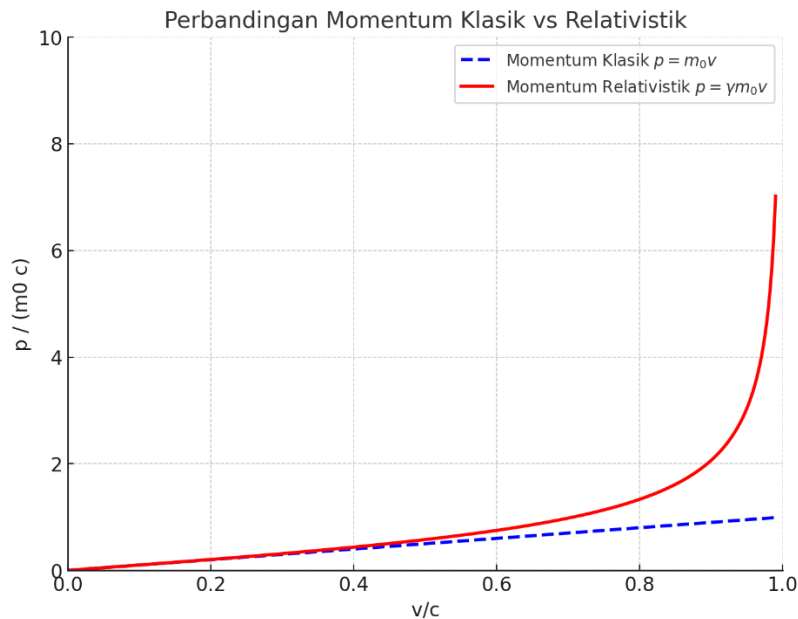
$m_0$  = massa benda saat diam (kg),

$v$  = kecepatan benda (m/s), dan

$m$  = massa benda saat bergerak (kg).

Semakin mendekati kecepatan cahaya, momentum meningkat drastis sehingga mempercepat benda menjadi semakin sulit.

Berikut ilustrasi jelas perbandingan:



**Garis biru putus-putus:** momentum klasik ( $p = m_0 v$ ), meningkat secara linier dengan kecepatan.

**Garis merah:** momentum relativistik ( $p = \gamma m_0 v$ ), hampir sama dengan klasik di kecepatan rendah, tetapi melonjak tajam saat  $v \rightarrow c$ .

Dari grafik terlihat, teori klasik berlaku baik pada  $v \ll c$ , namun tidak akurat pada kecepatan tinggi. Relativitas khusus menjelaskan bahwa momentum bertambah tanpa batas mendekati  $c$ , sehingga partikel bermassa tidak bisa mencapai kecepatan cahaya.

### Energi Relativistik

Energi total dalam relativitas adalah:

$$E = mc^2$$

atau

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Energi diam:

$$E_0 = m_0 c^2$$

Energi kinetik relativistik:

$$E_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2$$

## Implikasi Relativistik

### a. Tidak ada benda bermassa yang dapat mencapai kecepatan cahaya

Karena faktor Lorentz  $\gamma$  menjadi tak hingga jika  $v \rightarrow c$ :  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$

Sehingga energi kinetik yang dibutuhkan juga tak terbatas:

$$E = \gamma m_0 c^2$$

### b. Energi nuklir besar dapat dihasilkan dari perubahan massa kecil

Hukum kesetaraan massa-energi:  $E = \Delta m c^2$

Contoh penerapan: reaksi fisi (bom atom, PLTN) maupun fusi nuklir (matahari).



Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) – Canva.com

### c. Akselerator partikel mampu meningkatkan energi partikel tanpa melebihi kecepatan cahaya

Momentum dan energi partikel dalam relativitas:

$$p = \gamma m_0 v$$

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2$$

Energi partikel bisa terus bertambah melalui percepatan (meningkatkan  $p$ ), tetapi kecepatannya hanya mendekati  $c$ , tidak pernah melampauinya.

### Contoh Soal

Sebuah elektron memiliki massa diam  $m_0 = 9,1 \times 10^{-31}$  kg. Tentukan energi diamnya!  
( $c = 3 \times 10^8$  m/s)

#### Pembahasan:

$$E_0 = m_0 c^2 = (9,1 \times 10^{-31})(3 \times 10^8)^2$$

$$E_0 = (9,1 \times 10^{-31})(9 \times 10^{16})$$

$$E_0 = 8,19 \times 10^{-14} \text{ J}$$

Jadi, energi diam elektron adalah  $8,19 \times 10^{-14}$  J.



### Fakta Fisika di Sekitarmu

#### 1 Gram = Bom Nuklir

Bayangkan, hanya **1 gram massa** bisa berubah jadi energi sebesar bom atom. Semua berkat persamaan legendaris Einstein:  $E = mc^2$



Atom Nuklir – Canva.com

### Kegiatan Kelompok

#### Judul

Konsep Teori Relativitas Khusus

#### Tujuan

Menganalisis fenomena perubahan panjang, waktu, dan massa yang dikaitkan dengan kerangka acuan serta kesetaraan massa-energi dalam teori relativitas.

#### Cermati Teks Berikut

Bayangkan seorang astronot sedang melakukan perjalanan dengan kecepatan mendekati cahaya di luar angkasa. Dari sudut pandang astronot, jam di dalam roketnya berdetak normal. Namun, dari sudut pandang orang yang berada di Bumi, jam di roket tersebut berdetak lebih lambat. Fenomena ini menunjukkan adanya perbedaan hasil pengamatan antara kerangka acuan yang bergerak dan kerangka acuan yang diam.

#### Cara Kerja

Bentuk kelompok terdiri atas 3–5 siswa.

Diskusikan secara kritis pertanyaan berikut:

- Apa yang dimaksud dengan pengamat diam dan pengamat bergerak dalam konteks relativitas?
- Mengapa hasil pengamatan waktu berbeda antara astronot di roket dan pengamat di Bumi?

- c. Menurut kalian, bagaimana hubungan teori relativitas khusus dengan fenomena sehari-hari (contoh: GPS, partikel kosmik)?
- d. Jelaskan perbedaan cara pandang teori Newton dan teori Einstein dalam menjelaskan gerak benda pada kecepatan tinggi.

Buat ringkasan hasil diskusi kelompok dalam bentuk poin-poin singkat, lalu presentasikan secara kreatif di depan kelas.



## Rangkuman

### 1) Postulat Relativitas (Einstein)

- ▷ **Postulat 1:** Hukum-hukum fisika **sama** di semua kerangka acuan inersia.
- ▷ **Postulat 2:** Kecepatan cahaya di ruang hampa **konstan** ( $c = 3 \times 10^8 \text{ m/sc} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) bagi semua pengamat, apa pun gerak sumber/pengamatnya.
- ▷ Implikasi awal: ruang dan waktu **relatif**; perlu transformasi **Lorentz** (bukan Galileo) pada  $v$  mendekati  $c$ .

### 2) Relativitas Klasik (Newton) & Kerangka Inersia

- ▷ Benda mempertahankan keadaan (diam/gerak beraturan) jika **resultan gaya = 0** (Hukum Inersia).
- ▷ **Kerangka inersia:** kerangka yang tidak dipercepat; hukum Newton berlaku bentuknya sama.
- ▷ Pada kecepatan jauh lebih kecil dari  $c$ , mekanika Newton memadai.

### 3) Transformasi Galileo (kecepatan rendah)

- ▷ Untuk dua kerangka inersia  $O$  dan  $O'$  dengan  $O'$  bergerak ke arah  $+x$  berkecepatan  $v$ :

$$x' = x - vt, y' = y, z' = z, t' = t$$

- ▷ Penjumlahan kecepatan klasik:  $v'_x = v_x - v$ .
- ▷ Percepatan invarian:  $a'_x = a_x$ .
- ▷ **Keterbatasan:** menganggap waktu absolut  $\rightarrow$  bertentangan dengan konstannya  $c$ .

### 4) Eksperimen Michelson–Morley

- ▷ Mencari "eter" sebagai medium cahaya  $\rightarrow$  **hasil nol** (tak terdeteksi).
- ▷ Kesimpulan: **tak ada eter; kecepatan cahaya konstan**  $\rightarrow$  landasan Relativitas Khusus.

### 5) Transformasi Lorentz (kecepatan relativistik)

- ▷ Hubungan ruang–waktu untuk  $O$  dan  $O'$  (gerak relatif  $v$  sepanjang  $x$ ):

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad x' = \gamma(x - vt), \quad t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$$

$$y' = y, \quad z' = z$$

- ▷ Penjumlahan kecepatan relativistik:

$$v_x = \frac{v'_x + v}{1 + \frac{v'_x v}{c^2}}, \quad v_{12} = \frac{v_1 - v_2}{1 - \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

### 6) Kontraksi Panjang & Dilatasi Waktu

- ▷ Kontraksi panjang:

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{L_0}{\gamma} \quad (L < L_0)$$

- ▷ Dilatasi waktu:

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t \quad (\Delta t' > \Delta t)$$

## 7) Massa, Momentum, Energi Relativistik

- ▷ Massa relativistik (bila dipakai):  $m = \gamma m_0$ .
- ▷ Momentum:  $p = \gamma m_0 v$ .
- ▷ Energi total:  $E = \gamma m_0 c^2$ ; Energi diam:  $E_0 = m_0 c^2$ .
- ▷ Relasi energi-momentum:

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0 c^2)^2$$

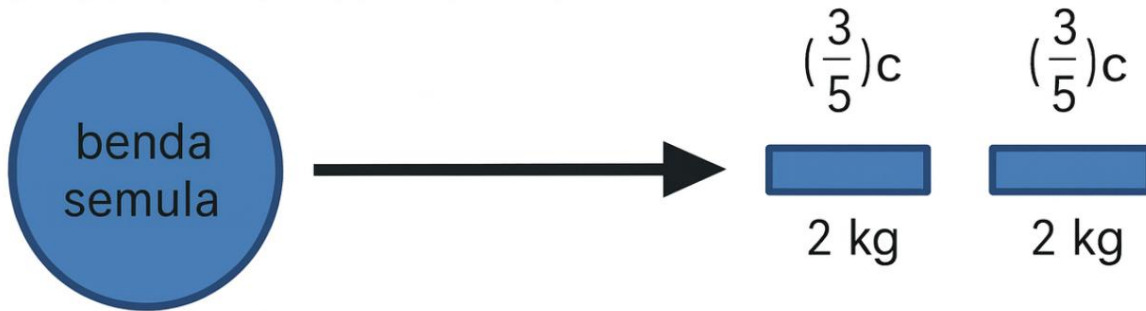
- ▷ Energi kinetik:  $E_k = E - E_0 = (\gamma - 1)m_0 c^2$ .

## 8) Implikasi Penting

- ▷ **Tidak ada** benda bermassa yang dapat mencapai  $c$  (butuh  $E \rightarrow \infty$  karena  $\gamma \rightarrow \infty$ ).
- ▷ **Kesetaraan massa-energi**: perubahan massa kecil menghasilkan energi besar  $E = \Delta m c^2$  (fisi/fusi, PLTN, Matahari).
- ▷ **Akselerator partikel**: dapat menaikkan energi/momentum partikel besar, tetapi kecepatannya hanya **mendekati**  $c$ , tidak pernah melewatinya.

### Latihan Soal

1. Perhatikan gambar berikut!



Sebuah benda yang mula-mula dalam keadaan diam, kemudian terpecah menjadi dua bagian. Setiap bagian memiliki massa 2 kg dan bergerak saling menjauhi dengan kecepatan  $\frac{3}{5}c$ . Massa diam benda semula adalah...

- A. 4 kg
  - B. 5 kg
  - C. 6 kg
  - D. 8 kg
  - E. 10 kg
2. Perhatikan pernyataan berikut mengenai teori relativitas khusus menurut Einstein:
- 1) Massa benda tidak konstan.
  - 2) Hukum fisika dapat dinyatakan dalam persamaan invariant pada kerangka acuan yang inersia.
  - 3) Selang waktu dua keadaan yang diamati oleh pengamat bergerak lebih lama daripada pengamat diam.
  - 4) Kecepatan cahaya di ruang hampa sama besar untuk semua pengamat, tidak bergantung pada keadaan gerak pengamat itu.

Pernyataan yang benar mengenai teori relativitas khusus menurut Einstein ditunjukkan oleh nomor ...

- A. (1), (2), dan (3)
  - B. (1) dan (3)
  - C. (1) dan (2)
  - D. (2) dan (4)
  - E. (3) dan (4)
3. Tongkat yang memiliki panjang 2 m diamati oleh Putra dan Rudi. Mereka bergerak sejalan dengan tongkat dengan kecepatan masing-masing  $0,6c$  dan  $0,8c$ .

Perbandingan persentase penyusutan panjang tongkat yang diamati oleh Putra terhadap tongkat yang diamati oleh Rudi adalah ...

- A. 3:4
- B. 3:5
- C. 4:5

- D. 4:3  
E. 5:3
4. Anto melakukan penelitian ke bulan dengan pesawat luar angkasa yang memiliki kecepatan  $0,8c$ . Setelah 15 tahun kemudian, Anto kembali ke Bumi. Menurut Andi yang berada di Bumi, penelitian yang dilakukan Anto sudah berlangsung selama ...
- A. 30 tahun  
B. 25 tahun  
C. 22,5 tahun  
D. 15 tahun  
E. 10,8 tahun
5. Kubus yang diam dan memiliki massa jenis  $9,0 \text{ g/cm}^3$  diamati oleh pengamat yang bergerak dengan kecepatan  $0,8c$  sejajar dengan salah satu rusuk kubus tersebut. Massa jenis kubus menurut pengamat yang bergerak adalah ...
- A.  $11,25 \text{ g/cm}^3$   
B.  $14 \text{ g/cm}^3$   
C.  $15 \text{ g/cm}^3$   
D.  $18 \text{ g/cm}^3$   
E.  $25 \text{ g/cm}^3$
6. Energi total partikel yang bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya adalah 10 MeV dan mempunyai momentum  $6 \text{ MeV}/c$  dengan  $c$  adalah kecepatan cahaya dalam hampa udara. Besar massa diam partikel tersebut adalah ...
- A.  $20 \text{ MeV}/c^2$   
B.  $12 \text{ MeV}/c^2$   
C.  $10 \text{ MeV}/c^2$   
D.  $8 \text{ MeV}/c^2$   
E.  $4 \text{ MeV}/c^2$
7. Sebuah benda bergerak dalam ruang hampa udara dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Massa benda tersebut dalam kerangka acuan yang diam diketahui adalah 2 kg. Jika benda tersebut bergerak dengan kecepatan  $0,9c$ , maka energi total benda tersebut adalah ...
- A.  $4,2 \times 10^{-16} \text{ J}$   
B.  $1,8 \times 10^{-16} \text{ J}$   
C.  $1,6 \times 10^{-16} \text{ J}$   
D.  $2,4 \times 10^{-16} \text{ J}$   
E.  $5,0 \times 10^{-16} \text{ J}$

Akses latihan soal  
lainnya di sini yuk!



Latihan Soal Fisika  
Kelas 12 BAB 6

## Referensi

Wikipedia Contributors. (2025, September 9). *Relativitas khusus*. *Wikipedia Bahasa Indonesia*. Diakses tanggal 20 Agustus 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Relativitas\\_khusus](https://id.wikipedia.org/wiki/Relativitas_khusus) Wikipedia

Wikipedia Contributors. (n.d.). *Kontraksi panjang*. *Wikipedia Bahasa Indonesia*. Diakses tanggal 20 Agustus 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Kontraksi\\_panjang](https://id.wikipedia.org/wiki/Kontraksi_panjang) Wikipedia

Wikipedia Contributors. (n.d.). *Transformasi Lorentz*. *Wikipedia Bahasa Indonesia*. Diakses tanggal 20 Agustus 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Transformasi\\_Lorentz](https://id.wikipedia.org/wiki/Transformasi_Lorentz) Wikipedia

Wikipedia Contributors. (n.d.). *Transformasi Galileo*. *Wikipedia Bahasa Indonesia*. Diakses tanggal 20 Agustus 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Transformasi\\_Galileo](https://id.wikipedia.org/wiki/Transformasi_Galileo) Wikipedia



# BAB 7: PRINSIP DAN FENOMENA KUANTUM

## Karakter Pelajar Pancasila

- **Bergotong royong:** mampu bekerja sama dengan teman untuk memahami konsep-konsep kuantum melalui diskusi dan kegiatan kelompok.
- **Bernalar kritis:** menganalisis fenomena kuantum secara logis, menilai informasi secara mendalam, serta menghubungkannya dengan penerapan nyata dalam sains dan teknologi.

**Kata Kunci:** Radiasi Benda Hitam, Hukum Stefan-Boltzmann, Hukum Pergeseran Wien, Teori Planck, Efek Fotolistrik, Efek Compton, Foton, Elektron, Sinar-X

## Tujuan Pembelajaran: Mengenal Prinsip dan Fenomena Kuantum

### 1. Menjelaskan Karakteristik Radiasi Benda Hitam serta Keterkaitannya dengan Hukum Stefan-Boltzmann, Hukum Pergeseran Wien, Hukum Rayleigh-Jeans, dan Distribusi Planck.

- ▷ Menguraikan bagaimana benda hitam memancarkan radiasi pada berbagai suhu.
- ▷ Menghubungkan hukum-hukum tersebut untuk memahami pola spektrum radiasi.

### 2. Menganalisis Pergeseran Panjang Gelombang Maksimum Radiasi Benda Hitam Menggunakan Teori Planck.

- ▷ Menunjukkan keterkaitan suhu benda dengan pergeseran spektrum radiasi.
- ▷ Membuktikan relevansi teori Planck dalam menjelaskan fenomena ini.

**3. Mendeskripsikan secara Kuantitatif Gejala Kuantum yang Berkaitan dengan Radiasi Benda Hitam, Efek fotolistrik, efek Compton, dan sinar-X.**

- ▷ Menyajikan perhitungan sederhana yang mendukung pemahaman sifat kuantum.
- ▷ Mengaitkan hasil perhitungan dengan penerapan dalam kehidupan sehari-hari.

**4. Menguraikan Konsep Foton beserta Penerapannya pada Efek Fotolistrik, Efek Compton, Sinar-X, dan Difraksi Elektron.**

- ▷ Menjelaskan peran foton dalam menjelaskan fenomena gelombang-partikel.
- ▷ Menghubungkan konsep tersebut dengan perkembangan teknologi modern.



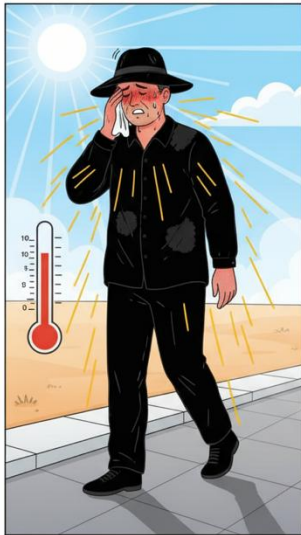
F I T R I





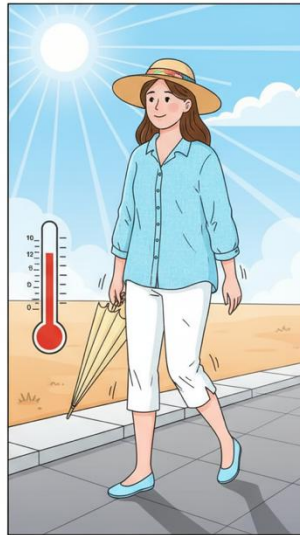
## 1. Energi Radiasi pada Benda Hitam

### SIANG HARI TERIK



PAKAIAN HITAM (GERAH)

### SIANG HARI TERIK



PAKAIAN CERAH (SEJUK)

*Ilustrasi Perbandingan Warna Pakaian pada Konsep Radiasi Benda Hitam – Gambar Ilustrasi Penerbit*

Pernahkah kamu mengenakan pakaian berwarna hitam saat berjalan di siang hari yang terik? Biasanya, tubuh akan terasa lebih cepat panas jika dibandingkan dengan saat mengenakan pakaian berwarna cerah. Hal ini terjadi karena warna hitam lebih banyak menyerap energi panas dari cahaya matahari. Sebaliknya, pakaian hitam terasa lebih hangat saat malam karena dapat menyerap sekaligus memancarkan energi panas dengan lebih baik. Fenomena ini menjadi dasar dari konsep **radiasi benda hitam**, yaitu peristiwa ketika suatu benda menyerap dan memancarkan energi radiasi.

Selain pakaian, konsep benda hitam juga terlihat pada termos, kompor, serta alat pemanas lainnya yang umumnya menggunakan warna gelap agar lebih efisien dalam meradiasikan energi panas. Pertanyaan yang muncul adalah bagaimana

radiasi ini terjadi, faktor-faktor apa saja yang memengaruhinya, dan bagaimana penjelasannya berdasarkan fisika klasik maupun fisika kuantum.

### Awal Penemuan Radiasi Termal

Pada abad ke-18 ditemukan fakta bahwa semua benda yang memiliki suhu dapat memancarkan energi panas dalam bentuk radiasi, tanpa dipengaruhi oleh keberadaan benda lain di sekitarnya. Radiasi ini umumnya berada pada frekuensi inframerah ketika suhu benda relatif rendah. Semakin tinggi suhu suatu benda, energi radiasi yang dipancarkannya juga semakin besar.

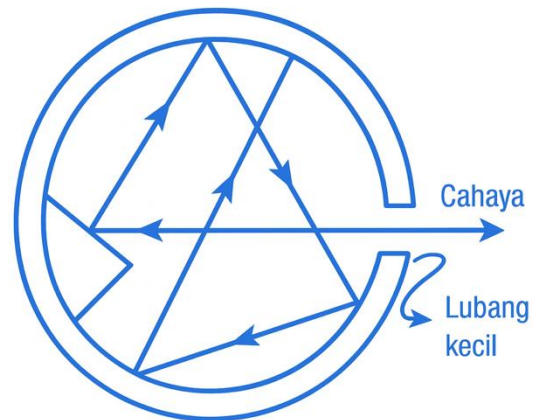
Pada abad ke-19, **Gustav Kirchhoff** memperkenalkan istilah **benda hitam** untuk pertama kali. **Benda hitam** adalah model ideal suatu benda yang mampu menyerap seluruh energi radiasi yang datang kepadanya, dan memancarkan kembali energi itu secara sempurna tanpa ada yang diteruskan maupun dipantulkan.

Dalam kenyataannya, tidak ada benda yang benar-benar bersifat benda hitam sempurna, namun banyak benda nyata yang memiliki sifat mendekati perilaku ini. Model benda hitam biasanya digambarkan sebagai sebuah rongga dengan lubang kecil di salah satu sisinya. Berkas cahaya yang masuk ke dalam lubang ini akan terpantul berkali-kali di dinding rongga, sehingga energi terserap sempurna dan tidak dapat keluar kembali.

## Proses Penyerapan dan Emisi Energi

Ketika cahaya masuk melalui lubang kecil ke dalam rongga benda hitam, cahaya tersebut akan terpantul terus-menerus di dalamnya hingga terserap sempurna. Jika suhu benda meningkat, dinding rongga akan memancarkan kembali energi radiasi ke luar. Karena energi yang masuk terserap sempurna dan energi yang keluar dipancarkan kembali, benda hitam dianggap mampu meradiasikan seluruh energi yang dimilikinya secara ideal.

Kirchhoff juga menjelaskan bahwa spektrum emisi dari benda hitam tidak bergantung pada bentuk, ukuran, atau jenis material, melainkan hanya pada suhu dan panjang gelombang radiasi.



Ilustrasi Pemodelan benda hitam – Gambar Ilustrasi Penerbit

## Hukum Stefan-Boltzmann

Beberapa tahun setelah teori Kirchhoff, penjelasan lebih lanjut diberikan oleh **Stefan-Boltzmann**. Mereka menyatakan bahwa **intensitas energi radiasi yang dipancarkan oleh suatu benda berbanding lurus dengan pangkat empat dari suhu mutlak permukaannya**. Secara matematis, hubungan ini dituliskan sebagai:

$$I = \frac{P}{A} = e\sigma T^4$$

dengan keterangan:

$I$  = intensitas radiasi benda hitam ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$P$  = daya radiasi benda hitam (W)

$A$  = luas permukaan benda ( $\text{m}^2$ )

$e$  = emisivitas benda ( $0 < e \leq 1$ )

$\sigma$  = tetapan Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$ )

$T$  = suhu mutlak (K)

Persamaan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu suatu benda, semakin besar pula energi radiasi yang dipancarkan per satuan luas permukaan. Oleh karena itu, benda bersuhu tinggi seperti bintang atau logam yang dipanaskan akan memancarkan energi dalam jumlah sangat besar.

Energi radiasi pada benda hitam merupakan konsep penting dalam memahami bagaimana energi panas diserap dan dipancarkan oleh benda. Meskipun benda hitam sempurna tidak ada dalam kehidupan nyata, model ini sangat membantu menjelaskan berbagai fenomena fisika, mulai dari alat rumah tangga hingga perilaku bintang di alam semesta.

### Contoh Soal

Jelaskan konsep benda hitam dan rumus hukum Stefan-Boltzmann yang digunakan untuk menghitung intensitas radiasi benda hitam!

#### Pembahasan:

Benda hitam adalah benda yang menyerap dan memancarkan seluruh energi yang diterimanya. Hukum Stefan-Boltzmann menyatakan bahwa intensitas radiasi benda hitam ( $I$ ) berbanding lurus dengan pangkat empat suhu benda ( $T$ ) dan dapat dihitung dengan rumus:

$$I = \sigma \cdot e \cdot T^4$$

Dimana:

- ▷  $I$  adalah intensitas radiasi ( $\text{W/m}^2$ ),
- ▷  $\sigma$  adalah tetapan Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ),
- ▷  $e$  adalah emisivitas benda ( $0 \leq e \leq 1$ ),
- ▷  $T$  adalah suhu benda dalam Kelvin (K).

Semakin tinggi suhu benda, semakin besar energi yang dipancarkan.



### Fakta Fisika di Sekitarmu

#### Kupu-Kupu dan Kamera Termal

Tahukah kamu kalau benda yang **terlihat dingin dan gelap** pun sebenarnya **memancarkan cahaya**? Nah, ini dia fakta unik tentang energi radiasi benda hitam (blackbody radiation) yang jarang orang tahu

Dengan prinsip bahwa semua benda memancarkan panas (radiasi inframerah), kamera termal dapat "melihat" panas tak kasat mata ini. Contoh menariknya, kamera termal bisa mengungkap bagaimana **sayap kupu-kupu** memiliki pola panas unik yang membantu mereka mengatur suhu tubuh, sebuah cara luar biasa bagi hewan berdarah dingin untuk bertahan hidup.



Kupu – Kupu dan Kamera Termal –  
Canva.com



## 2. Spektrum Pergeseran Wien dan Pendekatan Klasik Rayleigh–Jeans

Pada akhir abad ke-19, para fisikawan berusaha menjelaskan bentuk kurva spektrum radiasi termal dari benda hitam. Salah satunya adalah **Wilhelm Wien** yang berhasil menemukan hubungan sederhana antara panjang gelombang radiasi maksimum dan suhu benda hitam.

Wien menyatakan bahwa hasil kali antara panjang gelombang di puncak spektrum ( $\lambda_{\text{maks}}$ ) dengan suhu mutlak permukaan benda hitam ( $T$ ) bernilai konstan. Secara matematis dapat ditulis sebagai:

$$\lambda_{\text{maks}} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m K}$$

dengan keterangan:

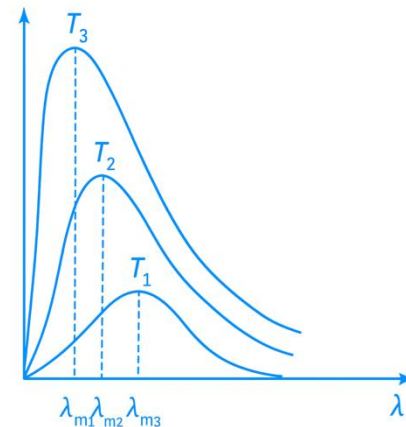
$\lambda_{\text{maks}}$  = panjang gelombang maksimum (m)

$T$  = suhu mutlak benda hitam (K)

Hukum ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu suatu benda, puncak radiasinya akan bergeser menuju panjang gelombang yang lebih pendek. Misalnya, saat suhu meningkat, cahaya yang dipancarkan akan bergeser dari daerah inframerah ke cahaya tampak, lalu ke arah ultraviolet. Oleh karena itu, bintang yang bersuhu tinggi tampak berwarna putih kebiruan, sedangkan bintang bersuhu rendah cenderung berwarna merah.

Namun, formulasi Wien hanya sesuai untuk radiasi pada panjang gelombang pendek (frekuensi tinggi). Ketika diaplikasikan pada panjang gelombang besar (frekuensi rendah), hukum ini tidak lagi sesuai dengan data eksperimen.

Grafik Pergeseran Wien saat  $T_1 < T_2 < T_3$  dan  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$  – Gambar Ilustrasi Penerbit



### Pendekatan Klasik Rayleigh–Jeans

Keterbatasan hukum Wien mendorong fisikawan lain, yaitu **Lord Rayleigh** dan **Sir James Jeans**, untuk mengembangkan pendekatan baru pada awal abad ke-20. Mereka menjelaskan radiasi benda hitam menggunakan hukum-hukum mekanika klasik.

Rayleigh dan Jeans menganggap bahwa radiasi dalam rongga benda hitam berbentuk gelombang berdiri (stasioner) yang dipantulkan secara terus-menerus oleh dinding-dinding rongga. Dengan menggunakan teorema ekvipartisi energi, mereka menurunkan persamaan rapat energi radiasi sebagai berikut:

$$\rho_E(\lambda, T) = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$

dengan keterangan:

$\rho_E(\lambda, T)$  = densitas energi radiasi ( $\text{J/m}^4$ )

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

$T$  = suhu mutlak benda hitam (K)

$\lambda$  = panjang gelombang (m)

Persamaan ini sesuai dengan hasil percobaan pada daerah panjang gelombang besar (frekuensi rendah). Akan tetapi, ketika diterapkan pada panjang gelombang kecil (frekuensi tinggi), persamaan ini

menghasilkan nilai energi yang sangat besar, bahkan tak terhingga. Fenomena ini dikenal dengan istilah **bencana ultraviolet (ultraviolet catastrophe)**.

### Perbandingan Hukum Wien dan Rayleigh–Jeans

- a. **Spektrum Pergeseran Wien:** berlaku baik untuk panjang gelombang pendek, tetapi gagal pada panjang gelombang panjang.
- b. **Pendekatan Rayleigh–Jeans:** berlaku baik pada panjang gelombang panjang, tetapi gagal pada panjang gelombang pendek karena prediksi energinya menuju tak terhingga.

Kedua teori ini, meskipun memiliki kelemahan, menjadi pijakan penting dalam perkembangan fisika modern. Ketidaksesuaian prediksi dengan eksperimen inilah yang akhirnya mendorong **Max Planck** memperkenalkan konsep kuantisasi energi, yang menjadi dasar teori kuantum.

Spektrum Pergeseran Wien menjelaskan hubungan suhu dengan panjang gelombang radiasi maksimum, tetapi hanya tepat untuk panjang gelombang pendek. Sementara itu, Pendekatan Klasik Rayleigh–Jeans mencoba menjelaskan distribusi energi radiasi dengan hukum mekanika klasik, namun gagal pada panjang gelombang pendek. Keterbatasan kedua teori ini akhirnya membuka jalan lahirnya **fisika kuantum**.

### Contoh Soal

Sebuah bintang memiliki suhu permukaan  $T = 6000 \text{ K}$ . Tentukan panjang gelombang maksimum radiasi yang dipancarkan bintang tersebut! (Diketahui: konstanta  $Wien = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$ )

#### Pembahasan

Gunakan Hukum Wien:

$$\lambda_{\text{maks}} T = 2,898 \times 10^{-3}$$

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{T}$$

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{6000} = 4,83 \times 10^{-7} \text{ m}$$

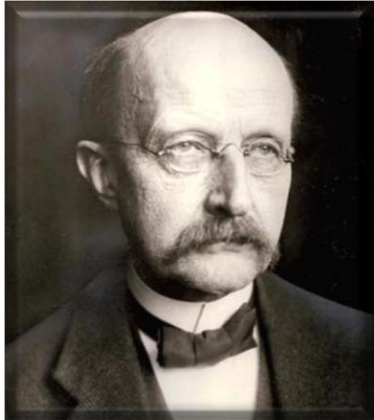
Hasil ini menunjukkan panjang gelombang maksimum berada pada daerah cahaya tampak (sekitar 483 nm, biru-hijau).

#### Jawaban:

$$\lambda_{\text{maks}} = 4,83 \times 10^{-7} \text{ m (483 nm, cahaya tampak biru-hijau)}.$$



### 3. Dasar Teori Kuantum Planck



Tokoh Fisikawan Max Planck – Britannica.com

Pendekatan fisika klasik yang digunakan Wien maupun Rayleigh–Jeans terbukti tidak mampu menjelaskan spektrum radiasi benda hitam pada semua rentang panjang gelombang. Hukum Wien hanya sesuai pada panjang gelombang pendek, sedangkan teori Rayleigh–Jeans hanya cocok pada panjang gelombang panjang. Kesenjangan inilah yang akhirnya diatasi oleh **Max Planck** pada awal abad ke-20 dengan memperkenalkan konsep baru yang sangat revolusioner, yaitu **teori kuantum**.

Planck mengusulkan bahwa energi radiasi tidak dipancarkan secara kontinu, melainkan dalam paket-paket diskrit yang disebut **kuanta energi**. Pandangan ini benar-benar berbeda dengan teori klasik dan menjadi dasar kelahiran **fisika kuantum**.

#### Hipotesis Kuantum Planck

Planck mengajukan beberapa gagasan pokok:

- Atom atau molekul yang bergetar hanya dapat menyerap atau memancarkan energi dalam jumlah tertentu, bukan sembarang nilai. Energi ini berbentuk paket-paket diskrit.
- Setiap paket energi disebut **kuantum**. Jika kuantum bergerak dengan kecepatan cahaya, ia disebut **foton**.
- Energi satu foton bergantung pada frekuensi radiasi ( $f$ ) dan berbanding terbalik dengan panjang gelombangnya ( $\lambda$ ).

Secara matematis:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

dengan keterangan:

$E$  = energi foton (J)

$h$  = konstanta Planck ( $6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

$f$  = frekuensi radiasi (Hz)

$c$  = kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

$\lambda$  = panjang gelombang (m)

Jika terdapat  $n$  foton, maka total energinya menjadi:

$$E = nhf$$



## Distribusi Energi Radiasi Menurut Planck

Planck berhasil menurunkan rumus rapat energi radiasi yang berlaku pada semua panjang gelombang:

$$\rho_E(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

dengan keterangan:

$\rho_E(\lambda, T)$  = rapat energi radiasi pada panjang gelombang  $\lambda$  lambda dan suhu  $T$  (J/m<sup>4</sup>)

$h$  = konstanta Planck ( $6,63 \times 10^{-34}$  J · s)

$c$  = kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s)

$\lambda$  = panjang gelombang (m)

$k$  = konstanta Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K)

$T$  = suhu mutlak (K)

Persamaan ini mampu menjelaskan keseluruhan spektrum radiasi benda hitam:

▷ Untuk  $\lambda$  kecil (frekuensi tinggi), hasilnya sesuai dengan hukum Wien.

▷ Untuk  $\lambda$  besar (frekuensi rendah), hasilnya mendekati persamaan Rayleigh–Jeans.

Dengan demikian, teori Planck menutup kekurangan kedua teori sebelumnya.

## Sifat Foton dan Intensitas Radiasi

Foton memiliki sifat khusus, yaitu ketika berinteraksi ia akan menyerahkan seluruh energinya sekaligus. Karena foton bergerak dengan kecepatan cahaya, menurut teori relativitas ia memiliki massa diam nol. Energi total foton berasal dari energi kinetiknya.

Menurut teori kuantum, energi radiasi dalam suatu berkas cahaya merupakan energi total dari seluruh foton yang dikandungnya. Intensitas radiasi cahaya berbanding lurus dengan jumlah foton yang menembus satuan luas dalam selang waktu tertentu.

Secara matematis:

$$I = \frac{nE}{At}$$

dengan keterangan:

$I$  = intensitas radiasi foton (W/m<sup>2</sup>)

$E$  = energi foton (J)

$A$  = luas bidang (m<sup>2</sup>)

$t$  = waktu (s)

$n$  = jumlah foton



Apabila terdapat dua berkas cahaya tampak dengan panjang gelombang dan frekuensi sama, maka energi tiap fotonnya sama. Namun, berkas cahaya yang lebih terang memiliki intensitas radiasi lebih tinggi karena jumlah fotonnya lebih banyak dibandingkan cahaya yang lebih redup.

Dasar Teori Kuantum Planck menyatakan bahwa energi radiasi tidak kontinu, tetapi dipancarkan dalam kuantum energi (foton). Dengan hipotesis ini, Planck berhasil menjelaskan distribusi radiasi benda hitam pada semua panjang gelombang. Teori ini sekaligus menjadi dasar perkembangan fisika kuantum yang kemudian melahirkan penjelasan penting lain, seperti efek fotolistrik dan model atom modern.

### Contoh Soal

Hitung energi satu foton cahaya merah dengan panjang gelombang  $\lambda = 700 \text{ nm}$ ! (Diketahui:  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

#### Pembahasan:

Gunakan rumus:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Substitusi nilai:

$$E = \frac{(6,63 \times 10^{-34})(3 \times 10^8)}{700 \times 10^{-9}}$$

$$E = \frac{1,989 \times 10^{-25}}{7,0 \times 10^{-7}}$$

$$E = 2,84 \times 10^{-19} \text{ J}$$

#### Jawaban:

Energi satu foton cahaya merah adalah  **$2,84 \times 10^{-19} \text{ J}$** .



## Fakta Fisika di Sekitarmu

### Warna Bintang Ditentukan Kuantum

Mengapa ada bintang merah, kuning, hingga biru?

Itu bukan sekadar soal "cat langit", melainkan karena radiasi benda hitam. Max Planck lewat teori kuantumnya menjelaskan bahwa suhu bintang menentukan panjang gelombang cahaya yang dipancarkan:

- ▷ Suhu rendah → puncak radiasi bergeser ke gelombang panjang → bintang tampak merah
- ▷ Suhu sedang → radiasi di daerah cahaya tampak → bintang tampak kuning (contohnya Matahari)
- ▷ Suhu tinggi → radiasi bergeser ke gelombang pendek → bintang tampak biru keputihan

Tanpa teori kuantum Planck, kita tak bisa memahami "warna-warni bintang" di langit malam.



Warna Bintang Ditentukan Kuantum –  
Canva.com



## 4. Fenomena Efek Fotolistrik



Lampu LED di Rumah – Canva.com

Apakah kamu pernah menggunakan lampu LED di rumah? Dibandingkan dengan lampu pijar, LED jauh lebih efisien, tahan lama, ramah lingkungan, serta menghasilkan cahaya lebih terang. Keunggulan ini tidak lepas dari penerapan prinsip **efek fotolistrik**.

Efek fotolistrik adalah peristiwa terlepasnya elektron dari permukaan logam ketika logam tersebut disinari cahaya dengan frekuensi tertentu. Elektron yang terlepas disebut **fotoelektron**. Fenomena ini hanya dapat dijelaskan dengan teori kuantum cahaya, karena teori klasik gagal memberikan penjelasan sesuai hasil percobaan.

### Sejarah Penemuan Efek Fotolistrik

Efek fotolistrik pertama kali diamati oleh **Heinrich Hertz** pada tahun 1887. Saat itu, Hertz menemukan bahwa cahaya mampu melepaskan elektron dari permukaan logam. Namun, teori klasik yang menyatakan cahaya sebagai gelombang gagal menjelaskan hasil percobaan ini.

Pada tahun 1905, **Albert Einstein** menggunakan konsep kuantum dari **Max Planck** untuk menjelaskan fenomena tersebut. Einstein mengemukakan bahwa cahaya terdiri atas paket-paket energi diskrit yang disebut **foton**. Energi foton inilah yang digunakan untuk membebaskan elektron dari permukaan logam.

### Konsep Dasar Efek Fotolistrik

Menurut teori kuantum cahaya:

- Setiap foton memiliki energi  $E = hf = \frac{hc}{\lambda}$ .
- Jika energi foton lebih besar dari energi minimum yang diperlukan untuk melepaskan elektron (fungsi kerja logam,  $W$ ), maka elektron akan terlepas.
- Energi kinetik maksimum fotoelektron yang terlepas ditentukan oleh:

$$E = hf = EK + W$$

atau

$$EK = hf - W$$

dengan keterangan:

$E$  = energi foton (J)

$h$  = konstanta Planck ( $6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

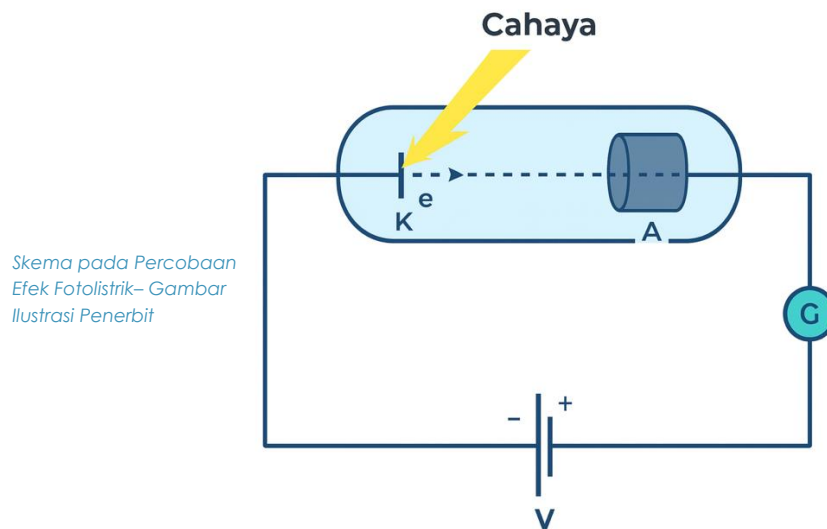
$f$  = frekuensi cahaya (Hz)

$c$  = kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

$\lambda$  = panjang gelombang (m)

$W$  = fungsi kerja logam (J)

$EK$  = energi kinetik maksimum elektron (J)



### Frekuensi Ambang

Untuk dapat melepaskan elektron dari logam, cahaya harus memiliki frekuensi minimum tertentu yang disebut **frekuensi ambang** ( $f_0$ ). Jika  $f < f_0$ , maka tidak ada fotoelektron yang terlepas, meskipun intensitas cahaya ditingkatkan.

Sebaliknya, jika  $f \geq f_0$ , maka elektron dapat terlepas. Semakin tinggi frekuensi cahaya, semakin besar energi kinetik elektron yang dihasilkan.

### Hubungan Intensitas Cahaya dengan Fotoelektron

Intensitas cahaya hanya memengaruhi **jumlah foton** yang datang. Semakin tinggi intensitas, semakin banyak foton yang tersedia untuk menumbuk elektron. Hal ini berarti semakin banyak elektron yang terlepas, sehingga arus listrik fotoelektron semakin besar. Namun, intensitas cahaya **tidak memengaruhi energi kinetik maksimum** elektron.

Secara matematis, intensitas radiasi cahaya dituliskan:

$$I = \frac{nE}{At}$$

dengan keterangan:

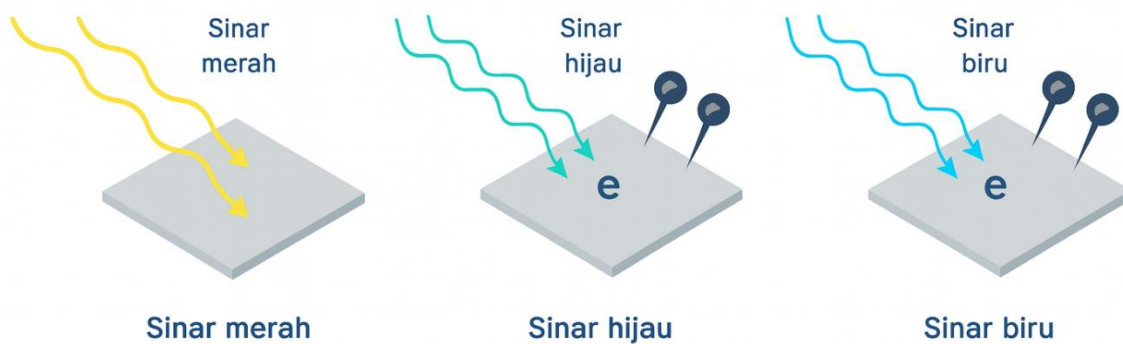
$I$  = intensitas radiasi cahaya ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$n$  = jumlah foton

$E$  = energi foton (J)

$A$  = luas bidang ( $\text{m}^2$ )

$t$  = waktu (s)



Gambar Percobaan Efek Fotolistrik– Gambar Ilustrasi Penerbit

### Potensial Henti

Untuk mengukur energi kinetik maksimum elektron, digunakan konsep **potensial henti ( $V_0$ )**. Potensial ini adalah beda potensial minimum yang mampu menghentikan elektron paling cepat agar tidak mencapai anoda. Hubungannya dirumuskan sebagai:

$$EK_{\text{maks}} = eV_0$$

dengan keterangan:

$EK_{\text{maks}}$  = energi kinetik maksimum fotoelektron (J)

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

$V_0$  = potensial henti (V)

Fenomena efek fotolistrik membuktikan bahwa cahaya memiliki sifat partikel selain sifat gelombangnya. Penjelasan melalui teori kuantum Planck dan Einstein menunjukkan bahwa cahaya terdiri atas foton, dan energi foton sebanding dengan frekuensinya. Efek fotolistrik inilah yang kemudian membuka jalan bagi perkembangan teknologi modern, mulai dari sel surya, sensor cahaya, hingga lampu LED yang kita gunakan sehari-hari.

### Contoh Soal

Jelaskan mengapa cahaya dengan frekuensi di bawah frekuensi ambang tidak dapat melepaskan elektron dari permukaan logam, meskipun intensitas cahayanya diperbesar!

### Pembahasan

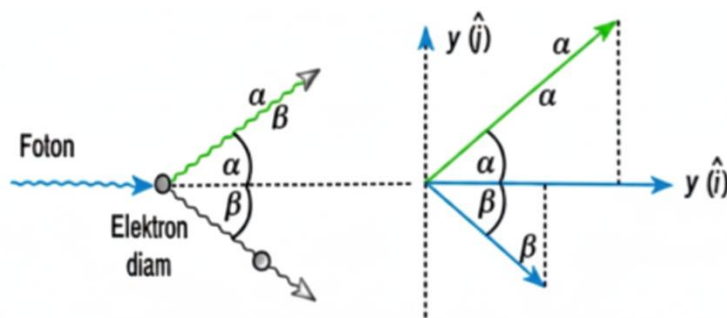
Menurut teori kuantum cahaya, setiap foton membawa energi sebesar  $E = hf$ . Untuk melepaskan elektron, energi foton harus lebih besar atau sama dengan fungsi kerja logam ( $W$ ). Frekuensi ambang ( $f_0$ ) adalah frekuensi minimum agar energi foton cukup untuk membebaskan elektron. Jika frekuensi cahaya lebih kecil dari  $f_0$ , energi tiap foton tidak cukup, sehingga tidak ada elektron yang terlepas, berapapun intensitas cahaya ditingkatkan. Intensitas hanya menambah jumlah foton, bukan energi per foton.



## 5. Fenomena Efek Compton

Setelah mempelajari efek fotolistrik, muncul pertanyaan: apa yang terjadi bila foton dengan energi tinggi mengenai elektron? Apakah selalu terjadi efek fotolistrik, atau fenomena lain dapat muncul? Pertanyaan ini terjawab melalui percobaan yang dilakukan oleh **Arthur H. Compton** pada tahun 1923.

Compton berangkat dari konsep kuantum cahaya yang menyatakan bahwa cahaya terdiri dari partikel-partikel kecil yang disebut **foton**. Karena bersifat partikel, foton diyakini memiliki momentum dan dapat mengalami tumbukan layaknya partikel lain.



*Fenomena Terjadinya Hamburan Setelah Foton dan Elektron Mengalami Tumbukan – Gambar Ilustrasi Penerbit*

### Eksperimen Compton

Dalam percobaannya, Compton menembakkan foton berenergi tinggi (seperti sinar-X atau sinar gamma) ke arah elektron pada logam. Hasilnya menunjukkan bahwa tidak selalu terjadi efek fotolistrik, melainkan elektron dan foton dapat saling bertumbukan dan mengalami **hamburan**. Fenomena ini disebut **efek Compton**.

Pada tumbukan tersebut, hukum kekekalan momentum dan hukum kekekalan energi berlaku. Hamburan yang terjadi bersifat elastis, artinya energi total sistem tetap terjaga meskipun distribusi energi antara elektron dan foton berubah.

### Pergeseran Panjang Gelombang

Berdasarkan hasil percobaan, Compton menemukan bahwa panjang gelombang foton setelah tumbukan ( $\lambda'$ ) lebih besar daripada panjang gelombang sebelum tumbukan ( $\lambda$ ). Perubahan ini dikenal sebagai **pergeseran Compton** dan dapat dihitung dengan rumus:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \alpha)$$

dengan keterangan:

$\lambda$  = panjang gelombang foton sebelum tumbukan (m)

$\lambda'$  = panjang gelombang foton setelah tumbukan (m)

$\Delta\lambda$  = pergeseran panjang gelombang (m)

$h$  = konstanta Planck ( $6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

$c$  = kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

$m_0$  = massa diam elektron ( $9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ )

$\alpha$  = sudut hamburan foton ( $^\circ$ )

Pergeseran panjang gelombang ini membuktikan bahwa foton memang memiliki momentum dan energi yang dapat berubah ketika bertumbukan dengan elektron.



## Implikasi Efek Compton

Dari percobaan Compton dapat disimpulkan:

- Setelah tumbukan, panjang gelombang foton bertambah ( $\lambda' > \lambda$ ), sehingga frekuensi berkurang ( $f' < f$ ).
- Energi foton berkurang ( $\Delta E = hf - hf'$ ), sedangkan elektron memperoleh energi kinetik.
- Foton yang memiliki kecepatan cahaya ( $c$ ) juga memiliki momentum relativistik.

Momentum foton dinyatakan sebagai:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Energi foton dapat dituliskan:

$$E^2 = (pc)^2 \Rightarrow E = pc$$

Hal ini menegaskan bahwa foton meskipun bermassa diam nol, tetap memiliki energi dan momentum.

Efek Compton membuktikan bahwa cahaya tidak hanya berperilaku sebagai gelombang, tetapi juga memiliki sifat partikel yang nyata. Fenomena ini memperkuat teori dualisme gelombang-partikel cahaya dan menjadi salah satu bukti penting dalam pengembangan fisika kuantum.

### Contoh Soal

Sebuah sinar-X memiliki panjang gelombang  $0,30 \text{ \AA}$ . Setelah bertumbukan dengan elektron diam, sinar-X tersebut mengalami hamburan pada sudut  $120^\circ$ . Hitunglah pergeseran Compton ( $\Delta\lambda$ ) yang terjadi!

#### Pembahasan:

Rumus pergeseran Compton:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \alpha)$$

Diketahui:

▷ Konstanta Compton elektron:  $\frac{h}{m_e c} = 2,43 \times 10^{-12} \text{ m}$

▷ Sudut hamburan:  $\alpha = 120^\circ$

Hitung:

$$\begin{aligned}\Delta\lambda &= (2,43 \times 10^{-12})(1 - \cos 120^\circ) \\ &= (2,43 \times 10^{-12})(1 - (-0,5)) \\ &= (2,43 \times 10^{-12})(1,5) \\ &= 3,65 \times 10^{-12} \text{ m}\end{aligned}$$

#### Jawaban:

Pergeseran Compton yang terjadi adalah  $\Delta\lambda = 3,65 \times 10^{-12} \text{ m}$



## Fakta Fisika di Sekitarmu

### Tahukah Kamu? Aplikasi Modern Efek Compton

Efek Compton bukan cuma teori di buku fisika, tapi juga banyak dipakai dalam kehidupan nyata. Misalnya, di rumah sakit ada CT-Scan yang bisa menampilkan gambar organ tubuh dengan jelas karena memanfaatkan hamburan sinar-X. Di luar angkasa, para astronom memakai efek ini untuk mendeteksi radiasi kosmik, seperti sinar dari bintang meledak atau lubang hitam. Di laboratorium, efek Compton juga dipakai untuk mempelajari susunan atom, sehingga ilmuwan bisa tahu bagaimana elektron tersusun tanpa merusak benda yang diteliti. Jadi, efek Compton membuat kita bisa lebih sehat, lebih tahu tentang alam semesta, dan lebih paham tentang atom.



CT – Scan – Canva.com

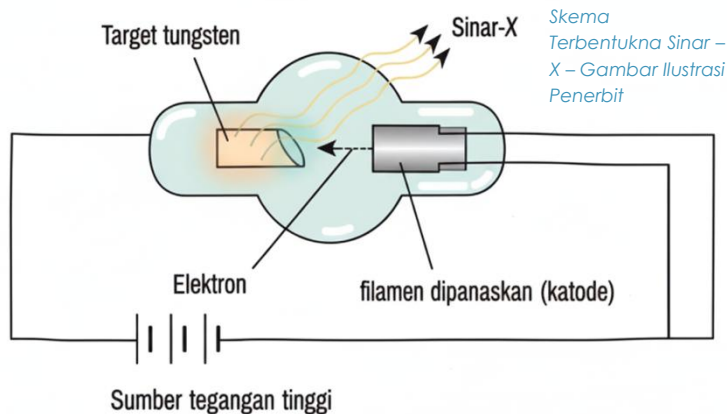


## 6. Fenomena dan Sifat Sinar-X

Dalam eksperimen Compton, sinar-X digunakan untuk mengamati tumbukan antara foton dan elektron. Namun, apa sebenarnya sinar-X itu, dan bagaimana mekanisme terbentuknya? Sinar-X adalah **gelombang elektromagnetik berenergi tinggi** dengan panjang gelombang sangat pendek, berkisar antara **0,01 Å hingga 100 Å**.

Proses terbentuknya sinar-X pada dasarnya merupakan kebalikan dari efek fotolistrik. Jika pada efek fotolistrik cahaya melepaskan elektron dari permukaan logam, maka sinar-X dihasilkan saat elektron berenergi tinggi menumbuk logam, lalu memancarkan energi dalam bentuk foton sinar-X. Sinar ini pertama kali ditemukan oleh **Wilhelm Roentgen** pada tahun 1895.

### Mekanisme Terbentuknya Sinar-X



Pada tabung sinar-X (lihat Gambar Skema Terbentuknya Sinar - X), katode dipanaskan sehingga melepaskan elektron-elektron. Elektron tersebut kemudian dipercepat dengan tegangan tinggi, sehingga bergerak menuju anode dengan kecepatan sangat besar.

Ketika elektron menumbuk anode, terjadi interaksi sebagai berikut:

- Elektron pada anode tereksitasi, kemudian kembali ke keadaan semula sambil memancarkan foton sinar-X.
- Energi kinetik elektron yang bergerak cepat berubah menjadi energi radiasi berupa sinar-X.

Energi kinetik elektron yang menumbuk anode dirumuskan:

$$EK = eV = Efoton$$

dengan keterangan:

$EK$  = energi kinetik elektron (J)

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

$V$  = beda potensial (V)

$E_{foton}$  = energi foton sinar-X (J)

Hubungan antara panjang gelombang minimum sinar-X dan beda potensial diberikan oleh:

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV}$$

dengan keterangan:

$\lambda_{\min}$  = panjang gelombang minimum sinar-X (m)

$h$  = konstanta Planck ( $6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

$c$  = kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

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

$V$  = beda potensial (V)

## Spektrum Sinar-X

Spektrum sinar-X terdiri atas dua bagian:

- Spektrum kontinu (bremsstrahlung):** dihasilkan akibat perlambatan elektron ketika menumbuk anode. Spektrum ini berbentuk kontinu dengan panjang gelombang minimum  $\lambda_{\min}$ .
- Spektrum karakteristik:** muncul sebagai garis-garis spektrum tajam pada panjang gelombang tertentu ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ ). Panjang gelombang ini bergantung pada jenis bahan anode yang digunakan, karena berasal dari transisi elektron antar tingkat energi pada atom logam anode.

Semakin besar nomor atom anode, semakin kecil panjang gelombang karakteristik yang dihasilkan.

## Sifat-Sifat Sinar-X

Sinar-X memiliki beberapa sifat penting, di antaranya:

- Tidak dapat dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnet.
- Memiliki daya tembus sangat tinggi, sehingga dapat menembus benda yang tidak tembus cahaya biasa.
- Dapat menghitamkan pelat fotografi.
- Bersifat ionisasi, artinya mampu mengionkan gas.
- Digunakan dalam berbagai bidang, terutama untuk **kedokteran (rontgen)**, mendeteksi cacat logam, sterilisasi alat medis, hingga sebagai alat **scanner** di bandara dan pusat perbelanjaan.

Sinar-X adalah radiasi elektromagnetik berenergi tinggi yang dihasilkan ketika elektron berkecepatan tinggi menumbuk logam anode. Spektrum sinar-X terdiri dari spektrum kontinu dan spektrum karakteristik, dengan sifat-sifat khas yang membuatnya sangat berguna dalam berbagai bidang ilmu pengetahuan dan kehidupan sehari-hari.

### Contoh Soal

**Jelaskan bagaimana mekanisme terbentuknya sinar-X di dalam tabung sinar-X dan sebutkan perbedaan antara spektrum kontinu dan spektrum karakteristik yang dihasilkan!**

#### Pembahasan:

Sinar-X terbentuk ketika elektron-elektron yang dilepaskan dari katode dipercepat oleh beda potensial tinggi menuju anode. Saat menumbuk anode, energi kinetik elektron berubah menjadi energi radiasi berupa sinar-X. Proses ini menghasilkan dua jenis spektrum. Pertama, **spektrum kontinu (bremsstrahlung)** yang muncul akibat perlambatan elektron saat menumbuk anode, sehingga panjang gelombangnya menyebar kontinu hingga mencapai panjang gelombang minimum. Kedua, **spektrum karakteristik** yang berupa garis-garis tajam pada panjang gelombang tertentu, bergantung pada jenis atom logam anode yang digunakan, karena berasal dari transisi elektron antar tingkat energi atom tersebut.



## 7. Fenomena Difraksi Elektron

Setelah memahami efek fotolistrik dan efek Compton, muncul pertanyaan baru: jika cahaya yang semula dianggap hanya sebagai gelombang ternyata dapat berperilaku seperti partikel, mungkinkah partikel seperti elektron dapat pula menunjukkan sifat gelombang?



Fisikawan Prancis Louis-Victor Pierre  
Raymond de Broglie – Wikipedia.com

Fenomena kuantum menjawab pertanyaan tersebut melalui hipotesis **Louis de Broglie** (1924). Ia menyatakan bahwa setiap partikel materi, termasuk elektron, tidak hanya memiliki sifat partikel, tetapi juga dapat berperilaku sebagai gelombang. Hipotesis ini dikenal sebagai **dualisme gelombang-partikel**.

### Panjang Gelombang de Broglie

Menurut teori gelombang elektromagnetik, hubungan energi dan momentum dinyatakan sebagai:

$$E = hf$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

dengan keterangan:

$E$  = energi (J)

$h$  = konstanta Planck ( $6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

$f$  = frekuensi (Hz)

$\lambda$  = panjang gelombang (m)

$p$  = momentum partikel (kg·m/s)

Untuk elektron yang bergerak dengan kecepatan  $v$ , momentumnya adalah  $p = mv$ . Dengan demikian panjang gelombang de Broglie dirumuskan sebagai:

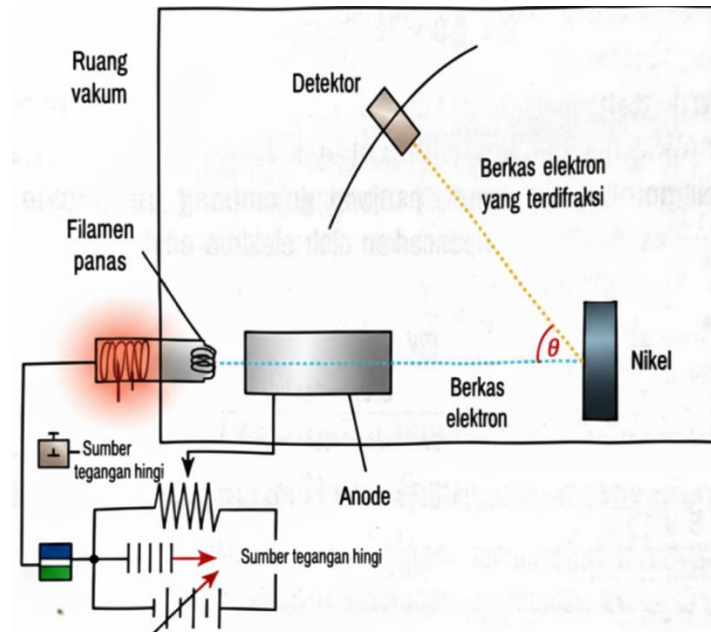
$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

### Eksperimen Davisson–Germer

Hipotesis de Broglie dibuktikan kebenarannya melalui percobaan yang dilakukan oleh **C.J. Davisson** dan **L.H. Germer** pada tahun 1927. Dalam percobaan ini, elektron ditembakkan menuju kristal nikel. Elektron yang menumbuk permukaan kristal akan terhambur ke berbagai arah.

Detektor kemudian digunakan untuk mengukur intensitas hamburan elektron pada berbagai sudut. Hasil pengukuran menunjukkan pola **puncak-puncak intensitas** yang sama seperti pola difraksi gelombang cahaya. Artinya, elektron memang dapat mengalami **difraksi**, sehingga terbukti bahwa partikel juga memiliki sifat gelombang.

Skema Percobaan  
Davisson–Germer –  
Gambar Ilustrasi  
Penerbit



### Persamaan Energi Kinetik Elektron

Elektron yang bergerak dengan percepatan akibat beda potensial  $V$  memperoleh energi kinetik sebesar:

$$EK = eV$$

atau

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV$$

Sehingga kecepatan elektron dapat ditulis:

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

Dengan mensubstitusikan ke dalam persamaan panjang gelombang de Broglie, diperoleh:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV}}$$

### Contoh Soal

Jelaskan bagaimana eksperimen Davisson–Germer membuktikan kebenaran hipotesis de Broglie tentang dualisme gelombang-partikel!

#### Pembahasan:

Hipotesis de Broglie menyatakan bahwa partikel materi, termasuk elektron, dapat berperilaku seperti gelombang dengan panjang gelombang  $\lambda = \frac{h}{p}$ . Kebenaran hipotesis ini dibuktikan melalui eksperimen Davisson–Germer (1927). Dalam percobaan tersebut, elektron ditembakkan ke kristal nikel, lalu hamburannya diamati dengan detektor. Hasilnya menunjukkan pola difraksi yang sama seperti gelombang cahaya. Pola ini hanya mungkin terjadi jika elektron juga memiliki sifat gelombang. Dengan demikian, eksperimen tersebut menjadi bukti nyata dualisme gelombang-partikel pada materi.

#### dengan keterangan:

$\lambda$  = panjang gelombang de Broglie (m)

$h$  = konstanta Planck ( $6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

$m$  = massa elektron ( $9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ )

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

$V$  = beda potensial (V)

Fenomena difraksi elektron membuktikan kebenaran hipotesis de Broglie bahwa partikel materi dapat menunjukkan sifat gelombang. Panjang gelombang partikel bergantung pada momentum atau energi kinetiknya. Dengan demikian, konsep **dualisme gelombang-partikel** tidak hanya berlaku pada cahaya, tetapi juga pada materi.



## Kegiatan Praktikum

**Judul:** Benda Hitam dan Warna Permukaan

**Tujuan:**

1. Menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi penyerapan energi pada benda hitam dan benda berwarna lain.
2. Mengidentifikasi pengaruh suhu terhadap benda hitam dibandingkan benda putih dan warna lain.
3. Menjelaskan hubungan warna permukaan dengan konsep radiasi termal dalam fisika modern.

**Alat dan Bahan:**

1. 3 botol yang dicat hitam, putih, dan perak.
2. 3 buah balon.
3. Air.
4. Termometer digital atau alkohol.
5. Stopwatch.

**Cara Kerja:**

1. Bekerjalah dalam kelompok beranggotakan 4–5 orang.
2. Isi air pada ketiga botol (hitam, putih, dan perak) dengan volume yang sama.
3. Tutup masing-masing botol dengan balon.
4. Letakkan ketiga botol di bawah sinar matahari secara bersamaan.
5. Amati perkembangan balon dan ukur suhu air dalam botol setiap 5 menit hingga 20 menit. Catat hasil pengamatan.

**Pertanyaan:**

1. Dengan berpikir kritis, jawab pertanyaan berikut:
  - a. Dari ketiga botol (hitam, putih, perak), pada botol manakah balon akan mengembang lebih cepat? Mengapa hal tersebut terjadi?
  - b. Bagaimana perbedaan suhu pada ketiga botol tersebut setelah 15 menit? Analisislah hubungan warna permukaan dengan energi yang diserap.
  - c. Apa peran radiasi elektromagnetik dalam percobaan ini? Jelaskan keterkaitannya dengan konsep benda hitam.
  - d. Hubungkan hasil percobaan ini dengan contoh nyata dalam kehidupan sehari-hari, misalnya penggunaan pakaian hitam dan putih di cuaca panas.
2. Buatlah laporan hasil percobaan dalam bentuk **jurnal mini ilmiah** yang memuat: latar belakang, tujuan, alat dan bahan, prosedur, data hasil pengamatan, analisis, kesimpulan, dan daftar pustaka.
3. Presentasikan hasil laporan kelompok di depan kelas dan diskusikan perbedaan hasil antar kelompok.

## Rangkuman

### 1) Fenomena Sehari-hari

Pakaian hitam lebih cepat panas di siang hari karena menyerap radiasi lebih banyak, sedangkan pakaian cerah memantulkan sebagian besar radiasi. Fenomena ini menjadi dasar konsep radiasi benda hitam.

### 2) Awal Penemuan Radiasi Termal

Semua benda bersuhu memancarkan energi dalam bentuk radiasi. Kirchhoff memperkenalkan *benda hitam* sebagai model ideal yang menyerap seluruh energi radiasi dan memancarkannya kembali secara sempurna.

### 3) Proses Penyerapan dan Emisi Energi

Radiasi yang masuk ke rongga benda hitam terserap sempurna dan dipancarkan kembali sesuai suhu. Spektrum radiasi hanya bergantung pada suhu, bukan bentuk atau material benda.

### 4) Hukum Stefan-Boltzmann

Intensitas radiasi berbanding lurus dengan pangkat empat suhu mutlak permukaan:

$$I = e\sigma T^4$$

Semakin tinggi suhu, semakin besar energi radiasi yang dipancarkan.

### 5) Hukum Pergeseran Wien

Panjang gelombang maksimum radiasi berbanding terbalik dengan suhu mutlak:

$$\lambda_{\text{maks}} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ mK}$$

Bintang panas tampak biru, sedangkan bintang dingin tampak merah.

### 6) Pendekatan Klasik Rayleigh-Jeans

Radiasi dijelaskan sebagai gelombang stasioner di dalam rongga. Rumus rapat energinya:

$$\rho_E(\lambda, T) = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}$$

Sesuai pada panjang gelombang besar, tetapi gagal pada panjang gelombang kecil (bencana ultraviolet).

### 7) Teori Kuantum Planck

Energi dipancarkan dalam bentuk paket diskrit (foton):

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Planck berhasil menjelaskan distribusi radiasi benda hitam di seluruh panjang gelombang dan membuka dasar fisika kuantum.

### Latihan Soal

1. Sebuah benda hitam sempurna pada suhu 300 K memancarkan intensitas radiasi sebesar  $200 \text{ W/m}^2$ . Agar intensitas radiasi meningkat menjadi  $3.200 \text{ W/m}^2$ , maka suhu benda tersebut adalah ....
  - A. 600 K
  - B. 1.200 K
  - C. 900 K
  - D. 750 K
  - E. 1.000 K
2. Jika panjang gelombang maksimum radiasi suatu bintang adalah  $500 \text{ nm}$ , maka suhu permukaan bintang tersebut menurut hukum Wien adalah ....
  - A. 5.800 K
  - B. 6.000 K
  - C. 5.200 K
  - D. 4.800 K
  - E. 7.200 K
3. Sebuah sumber cahaya memancarkan foton dengan panjang gelombang  $600 \text{ nm}$ . Energi satu foton yang dipancarkan adalah ....
  - A.  $2,5 \times 10^{-19} \text{ J}$
  - B.  $3,3 \times 10^{-19} \text{ J}$
  - C.  $4,0 \times 10^{-19} \text{ J}$
  - D.  $5,5 \times 10^{-19} \text{ J}$
  - E.  $6,6 \times 10^{-19} \text{ J}$
4. Sinar-X dengan panjang gelombang  $0,5 \text{ \AA}$  dihamburkan oleh elektron dengan sudut  $90^\circ$ . Pergeseran Compton yang terjadi adalah ....
  - A. 2,4 pm
  - B. 4,4 pm
  - C. 5,2 pm
  - D. 6,4 pm
5. 7,6 pm Berdasarkan hipotesis de Broglie, sebuah elektron dengan kecepatan  $2,2 \times 10^6 \text{ m/s}$  memiliki panjang gelombang sebesar ....
  - A.  $3,3 \times 10^{-10} \text{ m}$
  - B.  $2,2 \times 10^{-10} \text{ m}$
  - C.  $1,1 \times 10^{-10} \text{ m}$
  - D.  $6,6 \times 10^{-10} \text{ m}$
  - E.  $5,5 \times 10^{-10} \text{ m}$

6. Sebuah elektron dipercepat dengan beda potensi 200 V. Panjang gelombang de Broglie elektron tersebut adalah ....
- A.  $1,5 \times 10^{-10} \text{ m}$
  - B.  $2,7 \times 10^{-10} \text{ m}$
  - C.  $5,5 \times 10^{-10} \text{ m}$
  - D.  $3,3 \times 10^{-10} \text{ m}$
  - E.  $44,5 \times 10^{-10} \text{ m}$
7. Sebuah lampu memancarkan daya 100 W dalam bentuk foton dengan panjang gelombang 400 nm. Jumlah foton yang dipancarkan per detik adalah ....
- A.  $2,0 \times 10^{20}$
  - B.  $3,0 \times 10^{20}$
  - C.  $4,0 \times 10^{20}$
  - D.  $5,0 \times 10^{20}$
  - E.  $6,0 \times 10^{20}$

Akses latihan soal  
lainnya di sini yuk!



Latihan Soal Fisika  
Kelas 12 BAB 7

## Referensi

- Wikipedia. (n.d.-a). *Radiasi benda-hitam*. Diakses September 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Radiasi\\_benda-hitam](https://id.wikipedia.org/wiki/Radiasi_benda-hitam)
- Wikipedia. (n.d.-b). *Benda hitam*. Diakses September 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Benda\\_hitam](https://id.wikipedia.org/wiki/Benda_hitam)
- Wikipedia. (n.d.-c). *Hukum Stefan-Boltzmann*. Diakses September 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Hukum\\_Stefan%E2%80%93Boltzmann](https://id.wikipedia.org/wiki/Hukum_Stefan%E2%80%93Boltzmann)
- Wikipedia. (n.d.-d). *Hukum Planck*. Diakses September 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Hukum\\_Planck](https://id.wikipedia.org/wiki/Hukum_Planck)
- Wikipedia. (n.d.-e). *Hukum radiasi termal Kirchhoff*. Diakses September 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Hukum\\_radiasi\\_termal\\_Kirchhoff](https://id.wikipedia.org/wiki/Hukum_radiasi_termal_Kirchhoff)
- Wikipedia. (n.d.-f). *Radiasi termal*. Diakses September 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Radiasi\\_termal](https://id.wikipedia.org/wiki/Radiasi_termal)
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Fisika untuk Sains dan Teknik* (Edisi 6). Jakarta: Erlangga.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2011). *Fundamentals of Physics* (9th ed.). New York: Wiley.
- Giancoli, D. C. (2014). *Physics: Principles with Applications* (7th ed.). Boston: Pearson.
- Sutrisno, E. (2019). Radiasi benda hitam dalam pembelajaran fisika modern. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 15(2), 85–94. <https://doi.org/10.15294/jpfi.v15i2.21567>



# BAB 8: FISIKA NUKLIR DAN RADIOAKTIVITAS

## Karakter Pelajar Pancasila

**Bergotong Royong:** Mampu bekerja sama dalam memecahkan masalah kompleks dalam konteks ilmiah.

**Bernalar Kritis:** Mampu menilai dan merefleksikan penemuan ilmiah serta dampaknya.

**Kreatif:** Mampu berinovasi dan mengusulkan cara-cara baru dalam memanfaatkan teknologi nuklir untuk kemajuan masyarakat.

**Kata Kunci:** Atom, Elektron, Neutron, Proton, Peluruhan, Reaksi Fusi, Reaksi Fisi, Waktu Paro

**Tujuan Pembelajaran: Karakteristik Atom, Radioaktivitas, dan Dampaknya dalam Kehidupan**

**1. Menjelaskan partikel penyusun atom, sifat-sifatnya yang stabil dan tidak stabil, serta konsep radioaktivitas.**

- ▷ Memahami struktur atom dan peran partikel subatomiknya.
- ▷ Mempelajari perilaku inti yang stabil dan tidak stabil serta kaitannya dengan radioaktivitas.

**2. Mendeskripsikan isotop, isoton, dan isobar pada atom.**

- ▷ Menjelaskan pengertian isotop, isoton, dan isobar berdasarkan nomor atom dan nomor massa.
- ▷ Mempelajari peran mereka dalam reaksi nuklir serta aplikasi di berbagai bidang.



**3. Menganalisis karakteristik atom dan radioaktivitas serta dampaknya dalam kehidupan sehari-hari dan pemanfaatannya.**

- ▷ Meneliti pemanfaatan unsur radioaktif dalam bidang medis, energi, dan industri.
- ▷ Mempelajari dampak radiasi terhadap kesehatan dan lingkungan.

**4. Menjelaskan reaksi inti, termasuk reaksi fisi, reaksi fusi, dan proses peluruhan nuklir.**

- ▷ Memahami proses fisi dan fusi nuklir.
- ▷ Menganalisis bagaimana reaksi-reaksi ini menghasilkan energi dan relevansinya dalam teknologi modern.

**5. Membahas teknologi nuklir dan mengidentifikasi manfaat serta bahaya yang terkait.**

- ▷ Meneliti produksi energi nuklir dan penggunaannya di berbagai sektor.
- ▷ Memahami risiko radiasi dan langkah-langkah keselamatan yang diterapkan dalam teknologi nuklir.



**F I T R I**





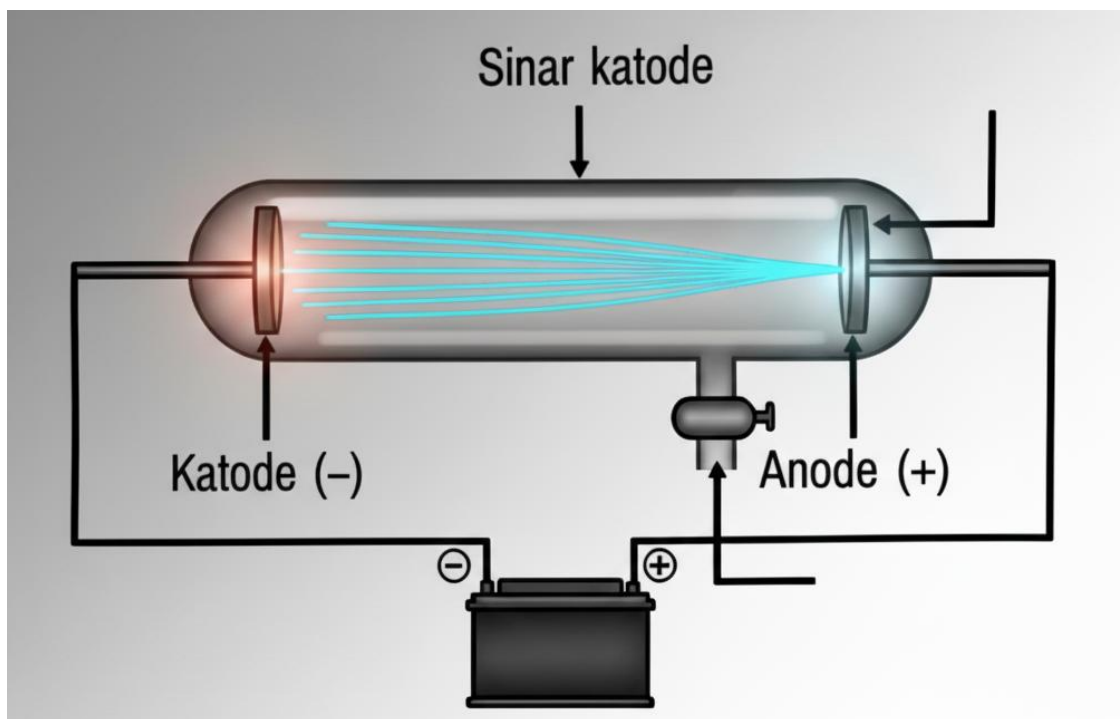
## 1. Struktur Penyusun Atom

Pada kehidupan sehari-hari, kita sering mendengar istilah "atom," namun, apakah kita tahu bagaimana benda-benda yang ada di sekitar kita dapat terbentuk? Semua materi yang ada di alam semesta ini tersusun atas atom-atom yang membentuknya. Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh **Democritus** pada abad ke-4 SM, yang menyatakan bahwa setiap benda tersusun atas partikel-partikel kecil yang tidak dapat dibagi lagi. Pandangan ini berlanjut dan disempurnakan oleh ilmuwan lainnya.

Pada tahun 1803, **John Dalton** mengemukakan teori atom yang lebih terstruktur. Dalton menjelaskan bahwa materi tersusun atas partikel-partikel kecil yang disebut atom, yang bersifat tidak dapat dibagi lebih kecil lagi. Namun, seiring berjalannya waktu, penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa atom itu sendiri terdiri dari sub-partikel yang lebih kecil, yaitu **elektron, proton, dan neutron**.

### Elektron

Penemuan elektron pertama kali dilakukan oleh **J.J. Thomson** pada tahun 1898 melalui eksperimen dengan tabung sinar katoda. Sinar katoda merupakan radiasi yang terbentuk akibat pergerakan partikel-partikel bermuatan negatif dalam tabung kaca yang bertekanan rendah. Dalam percobaannya, sinar ini menghasilkan cahaya berwarna hijau saat terkena layar fluoresen. Hal ini membuktikan bahwa partikel yang membentuk sinar katoda adalah **elektron**, yang merupakan partikel bermuatan negatif.



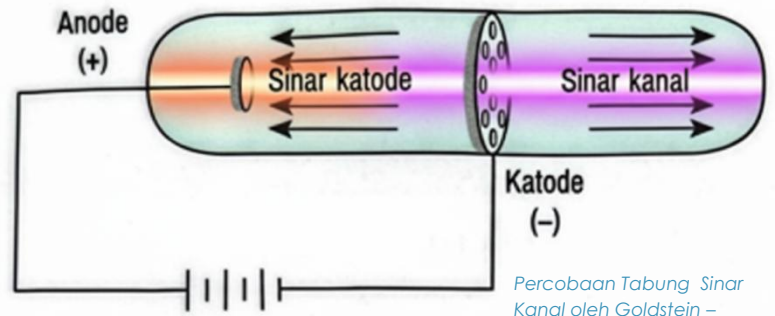
*Percobaan Tabung Sinar Katoda oleh J.J. Thomson – Gambar Ilustrasi Penerbit*

Gambar ini menunjukkan eksperimen yang dilakukan oleh Thomson, di mana sinar katoda yang terbentuk bergerak dari katoda (muatan negatif) menuju anoda (muatan positif) dan menghasilkan cahaya berwarna hijau. Eksperimen ini memberikan bukti bahwa atom tidak hanya terdiri dari satu jenis partikel, tetapi terdiri dari partikel-partikel kecil yang lebih sederhana. Elektron ini memiliki muatan negatif dan ditemukan mengelilingi inti atom.

## Proton

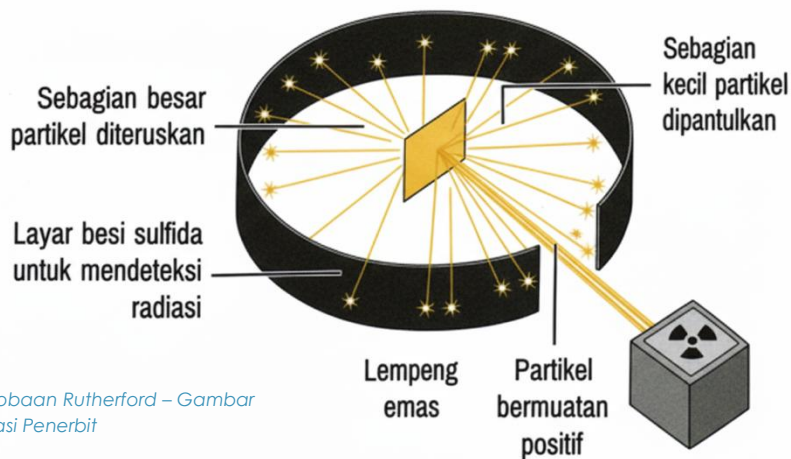
Sebelum ditemukannya elektron, seorang ilmuwan bernama **Eugene Goldstein** melakukan eksperimen menggunakan tabung sinar katoda yang dilengkapi dengan gas bertekanan rendah. Dalam eksperimennya, Goldstein menemukan adanya sinar yang bergerak ke arah berlawanan dengan sinar katoda, yang disebut **sinar kanal**. Sinar ini ternyata terdiri dari partikel bermuatan positif, yang kemudian dikenal sebagai **proton**. Proton ditemukan berada di inti atom dan memiliki muatan positif.

Gambar ini menunjukkan tabung percobaan yang digunakan oleh Goldstein untuk menemukan proton. Sinar yang bergerak ke arah berlawanan dengan sinar katoda disebut sinar kanal, yang terdiri dari partikel bermuatan positif (proton).



Penemuan ini menunjukkan bahwa atom tidak hanya terdiri dari partikel bermuatan negatif (elektron), tetapi juga partikel bermuatan positif (proton) yang membentuk inti atom.

Lalu, pada awal abad ke-20, **Ernest Rutherford** melakukan percobaan untuk mengidentifikasi partikel-partikel dalam inti atom. Dalam eksperimennya, Rutherford menembakkan partikel sinar alfa ( $\alpha$ ) pada pelat emas tipis. Percobaan ini menghasilkan pantulan yang menunjukkan bahwa inti atom tersusun atas partikel bermuatan positif, yang kemudian dikenal sebagai **proton**. Rutherford menemukan bahwa proton berada di inti atom dan memiliki muatan positif.



Gambar ini menunjukkan percobaan Rutherford yang digunakan untuk menemukan proton. Percobaan ini melibatkan tembakan sinar alfa pada pelat emas, yang menghasilkan pantulan yang memberikan wawasan mengenai struktur inti atom.

## Neutron

Berdasarkan eksperimen yang dilakukan oleh **Rutherford**, selain ditemukan bahwa muatan positif (proton) terdapat pada inti atom, Rutherford juga menyimpulkan bahwa terdapat partikel dengan muatan netral di dalam inti atom, karena massa inti atom lebih besar dibandingkan dengan massa proton dalam inti tersebut. Hal ini yang menyebabkan banyak ilmuwan berpendapat bahwa ada partikel lain selain proton dalam inti atom. Pada tahun 1930, **W. Bothe** dan **H. Becker** melakukan eksperimen untuk membuktikan hipotesis Rutherford dengan menembakkan partikel alfa ke inti atom beryllium. Kemudian, pada tahun 1932, **James Chadwick**, seorang ahli fisika dari Inggris, melakukan eksperimen yang akhirnya membuktikan adanya

partikel yang tidak bermuatan (netral), yang juga merupakan partikel penyusun inti atom yang memiliki massa sedikit lebih besar daripada proton. Partikel ini dikenal dengan nama **neutron**.

### Contoh Soal

Jelaskan perkembangan penemuan partikel penyusun atom dari Dalton hingga penemuan proton dan neutron!

Pembahasan:

- ▷ **Dalton (1803)**: Mengemukakan teori atom, menyatakan atom adalah partikel terkecil yang tidak bisa dibagi lagi.
- ▷ **Thomson (1898)**: Menemukan **elektron** melalui eksperimen sinar katoda, partikel bermuatan negatif yang mengelilingi inti.
- ▷ **Goldstein (1899)**: Menemukan **proton**, partikel bermuatan positif, dalam eksperimen sinar kanal.
- ▷ **Rutherford (1911)**: Menemukan **proton** berada di inti atom.
- ▷ **Chadwick (1932)**: Menemukan **neutron**, partikel netral yang ada di inti atom bersama proton.



### Fakta Fisika di Sekitarmu

#### Neutron dan Pengobatan Kanker

Penemuan **neutron** oleh **James Chadwick** memiliki pengaruh besar dalam dunia **kedokteran**. Neutron digunakan dalam **terapi radiasi** untuk pengobatan kanker, yang membantu menghancurkan sel kanker tanpa merusak jaringan sehat di sekitarnya. Dengan pemahaman tentang neutron, kita bisa memberikan perawatan yang lebih tepat dan efektif bagi pasien kanker.



*Dunia Kedokteran terbantu dengan penemuan neutron – Canva.com*



## 2. Struktur Inti Atom

Setelah mengetahui partikel-partikel penyusun atom, pertanyaan yang sering muncul adalah: apakah setiap unsur memiliki struktur inti yang sama? Apa yang membuat suatu inti atom bersifat stabil? Dan bagaimana hubungan antara struktur inti dengan kestabilan suatu atom?

Sebuah atom terdiri dari inti atom yang mengandung proton dan neutron, serta elektron yang bergerak mengelilinginya. Berdasarkan percobaan yang dilakukan oleh **Ernest Rutherford**, inti atom terbentuk dari partikel bermuatan positif yang disebut **proton**. Penelitian lebih lanjut oleh **H.G.J. Moseley**, dengan menggunakan sinar-X yang dipancarkan oleh proton dalam atom, menemukan bahwa jumlah proton dalam inti atom berkaitan langsung dengan nomor atomnya.

Menurut **Moseley**, nomor atom ((Z)) menunjukkan jumlah proton yang terkandung dalam inti atom. Dengan demikian, nomor atom juga sama dengan jumlah elektron dalam atom yang netral. Hubungan antara jumlah proton dan jumlah elektron dalam atom dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{Nomor atom (Z)} = \text{Jumlah proton} = \text{Jumlah elektron}$$

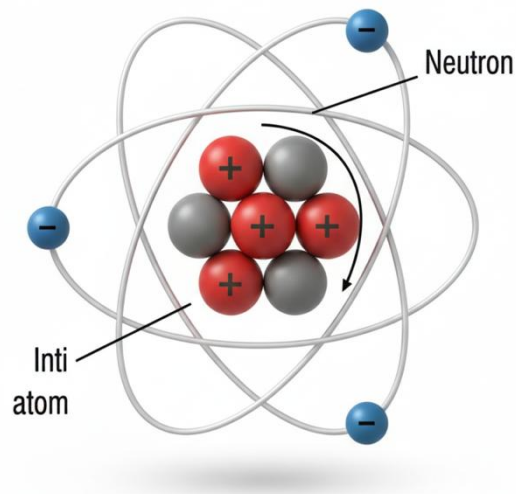
Gambar di samping ini menunjukkan struktur umum dari atom yang terdiri dari inti atom yang mengandung proton dan neutron, serta elektron yang berputar mengelilingi inti.

Inti atom tersusun atas partikel-partikel yang disebut **nukleon**, yang terdiri dari proton dan neutron. Sementara itu, atom yang diketahui jumlah proton dan neutrontya disebut **nuklida**. Setiap unsur kimia memiliki sejumlah nuklida dengan komposisi jumlah proton dan neutron yang berbeda-beda.

Massa atom dapat dianggap hanya berasal dari massa inti atom, karena massa elektron sangat kecil dibandingkan dengan massa inti. Massa atom ini disebut **nomor massa (A)**, yang dapat dihitung dengan menjumlahkan jumlah proton dan neutron dalam inti atom. Secara matematis, hubungan ini dapat dituliskan dengan rumus:

$$A = \text{jumlah proton} + \text{jumlah neutron}$$

Berdasarkan rumus ini, jumlah **neutron (n)** dalam inti atom dapat dihitung jika nomor massa dan nomor atom sudah diketahui. Secara umum, suatu atom dapat dinyatakan dalam bentuk berikut:



Struktur Inti Atom – Gambar Ilustrasi Penerbit

Dimana:

( X ) = nama unsur

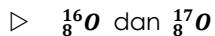
( Z ) = nomor atom (jumlah proton)

( A ) = nomor massa (jumlah proton + jumlah neutron)

Inti atom terdiri atas partikel-partikel yang disebut **nukleon**, yang terdiri dari **proton** dan **neutron**. Sementara itu, inti atom yang diketahui jumlah proton dan neutron-nya disebut **nuklida**, yang diklasifikasikan berdasarkan jumlah proton dan neutron.

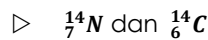
#### a. Isotop

Isotop adalah atom-atom dari unsur yang sama yang memiliki nomor atom yang sama, tetapi berbeda dalam nomor massanya. Contoh isotop adalah:



#### b. Isobar

Isobar adalah atom-atom yang memiliki nomor massa yang sama, tetapi nomor atomnya berbeda. Contohnya adalah:



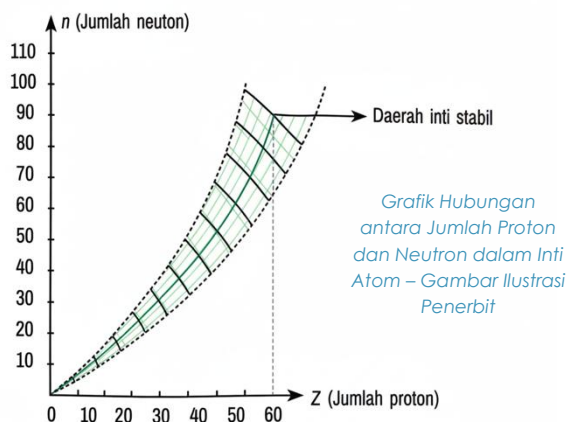
#### c. Isoton

Isoton adalah atom-atom yang memiliki jumlah neutron yang sama, tetapi jumlah protonnya berbeda. Contohnya adalah:



Atom yang stabil memiliki jumlah proton yang sama dengan jumlah neutronnya ( $n = Z$ ). Sementara itu, atom yang tidak stabil memiliki jumlah neutron lebih banyak dibandingkan jumlah proton ( $n > Z$ ). Atom jenis ini disebut atom **radioaktif**, yang memiliki kecenderungan untuk membentuk inti stabil dengan memancarkan sinar-sinar radioaktif sampai tercapai kestabilan inti tersebut.

Pada inti atom, jika terjadi kelebihan jumlah neutron yang disebabkan oleh gaya tolak Coulomb antarproton, proton berada pada posisi yang tidak stabil. Semakin besar jumlah nukleon, jumlah proton akan meningkat sedikit jika dibandingkan dengan jumlah neutron.



#### Energi Ikat Inti

Energi yang mengikat inti atom disebut **energi ikat inti**. Energi ikat ini terbentuk karena adanya perbedaan antara massa suatu inti dengan massa nukleon penyusunnya. Berdasarkan hasil pengukuran, diperoleh bahwa massa inti stabil lebih kecil daripada jumlah massa dari nukleon pembentuknya. Selisih massa ini disebut **defek massa** yang dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{inti}}$$

Keterangan rumus:

$\Delta m$  = defek massa (kg)

$Z$  = jumlah proton

$m_p$  = massa proton (kg)

$A - Z$  = jumlah neutron

$m_n$  = massa neutron (kg)

$m_{\text{inti}}$  = massa inti (kg)

Selain itu, energi ikat inti dapat dihitung dengan menggunakan rumus Einstein, yaitu:

$$E = \Delta mc^2$$

**Dengan:**

$E$  = energi ikat (Joule)

$\Delta m$  = defek massa (kg)

$c$  = kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )

Jika satuan massa dalam sma, satuan energi ikat dalam MeV (mega elektron volt), karena  $1 \text{ sma} = 931 \text{ MeV}$  dan  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ , maka energi ikat inti dapat dihitung dengan rumus:

$$E = \Delta m \times 931 \text{ MeV}$$

### Contoh Soal

Jelaskan hubungan antara struktur inti atom dan kestabilan atom! Bagaimana cara menghitung jumlah neutron dalam atom?

#### Pembahasan:

##### ▷ Struktur Inti Atom dan Kestabilan:

Atom terdiri dari inti yang mengandung **proton** (muatan positif) dan **neutron** (tanpa muatan), dengan **elektron** mengelilinginya. **Nomor atom (Z)** menunjukkan jumlah proton dan elektron dalam atom yang netral. Atom stabil memiliki jumlah proton sama dengan jumlah neutron ( $n = Z$ ), sementara atom yang tidak stabil (radioaktif) memiliki lebih banyak neutron ( $n > Z$ ).

##### ▷ Menghitung Jumlah Neutron:

Jumlah neutron ( $n$ ) dapat dihitung dengan rumus:

$$n = A - Z$$

Dimana:

A = Nomor massa (jumlah proton + neutron)

Z = Nomor atom (jumlah proton)





### 3. Proses Radioaktivitas

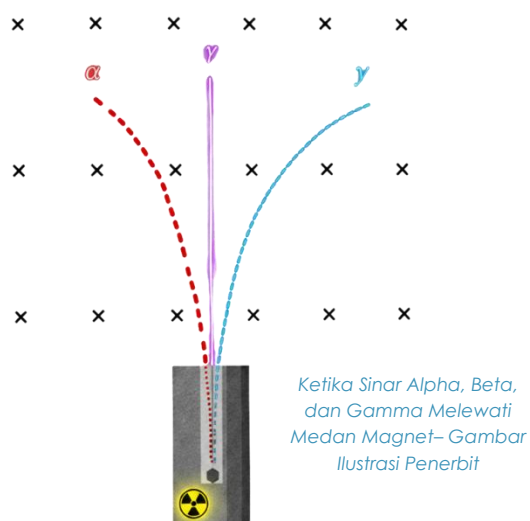
Seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab sebelumnya, inti atom suatu unsur dapat bersifat stabil atau tidak stabil. Lalu, bagaimana dengan inti atom yang tidak stabil? Apakah ia akan selalu berada dalam keadaan tidak stabil? Jika tidak, apa yang dilakukan oleh inti tersebut agar menjadi stabil?

Pengetahuan tentang inti atom dimulai pada tahun 1896 ketika **Antoine Henri Becquerel** menemukan gejala radioaktivitas secara tidak sengaja. Ia memperhatikan bahwa bahan tertentu yang memancarkan sinar mampu menampilkan sifat fluoresensi dan fosforesensi, yang membuktikan bahwa bahan tersebut bersifat radioaktif. Penyelidikan lebih lanjut oleh ilmuwan seperti **Pierre Curie** dan **Marie Curie** mengarah pada penemuan unsur-unsur baru, seperti **polonium** dan **radium**, yang juga menunjukkan sifat radioaktif.

Radioaktivitas adalah sifat suatu unsur yang dapat memancarkan radiasi secara spontan dan biasanya bersifat tidak stabil. Hal ini dilakukan oleh inti atom yang tidak stabil untuk menjadi stabil.

#### Partikel Radiasi

Unsur-unsur yang bersifat radioaktif dapat memancarkan tiga jenis radiasi, yaitu sinar **alpha ( $\alpha$ )**, sinar **beta ( $\beta$ )**, dan sinar **gamma ( $\gamma$ )**. Arah ketiga sinar radioaktif ini ketika melewati medan magnet adalah keluar dari bidang seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar ini menggambarkan bagaimana partikel sinar alpha, beta, dan gamma dipengaruhi oleh medan magnet.

Ketika sinar **alpha ( $\alpha$ )** dibelokkan ke kiri dalam medan magnet, sinar  $\alpha$  bergerak dengan muatan listrik positif. Pada tahun 1908, **Rutherford** dan **Geiger** menemukan bahwa sinar alpha merupakan partikel bermuatan dua kali muatan elektron ( $2e$ ), dengan massa empat kali massa hidrogen, yang dikenal sebagai inti helium  ${}^4_2\text{He}$ .

Sebaliknya, ketika sinar **beta ( $\beta$ )** dibelokkan ke kanan dalam medan magnet, sinar  $\beta$  bermuatan negatif. Sinar  $\beta$  memiliki daya tembus yang lebih besar dibandingkan sinar

alpha, namun daya ionisasi sinar beta lebih kecil dibandingkan dengan sinar alpha.

Untuk sinar **gamma ( $\gamma$ )** tidak terpengaruh oleh medan magnet sehingga dapat disimpulkan bahwa sinar gamma adalah gelombang elektromagnetik. Sinar  $\gamma$  memiliki daya tembus yang sangat besar dan daya ionisasi yang sangat kecil.

Dengan demikian, urutan daya ionisasi sinar radioaktif adalah sinar  $\gamma < \text{sinar } \beta < \text{sinar } \alpha$ . Sementara itu, urutan daya tembus sinar radioaktif adalah sinar  $\alpha < \text{sinar } \beta < \text{sinar } \gamma$ .

Selain sinar  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$ , ketika inti atom mengalami peluruhan, inti atom juga dapat memancarkan partikel-partikel radiasi lainnya. Setiap partikel ini memiliki massa dan muatan yang berbeda, yang dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Jenis Partikel Radiasi	Simbol	Muatan	Massa
Neutron	${}_0^1n$	0	1
Proton	${}_1^1p$ atau ${}_1^1H$	+1	1
Positron	${}_{+1}^0e$	+1	0
Deuteron	${}_1^2D$ atau ${}_1^2H$	+1	2
Triton	${}_1^3T$ atau ${}_1^3H$	+1	3

### Alat-Alat Deteksi Sinar Radioaktif



*Nuklir Bisa Dideteksi Menggunakan Alat Khusus – Canva*

Sinar radioaktif seperti sinar  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  tidak bisa dilihat dengan mata telanjang, sehingga diperlukan alat khusus untuk mendeteksinya. Sinar-sinar ini dapat terdeteksi menggunakan alat yang sensitif, yaitu detektor yang berfungsi sebagai transduser. Detektor radiasi nuklir digunakan untuk memanfaatkan interaksi radiasi dengan materi, menghasilkan sinyal yang mudah dilihat dan diukur.

Ada berbagai alat yang digunakan untuk mendeteksi sinar radioaktif, seperti detektor Geiger Muller, kamar kabut Wilson, foto emulsi, dan detektor sintilasi. Pencacah Geiger Muller bekerja dengan memanfaatkan ionisasi gas sehingga dapat mengukur sinar radioaktif yang melewatinya. Semakin banyak sinar radioaktif yang terdeteksi, semakin sering suara klik yang terdengar.

Pada kamar kabut Wilson, sinar radioaktif yang melewati akan mengionisasi atom-atom uap yang ada, menciptakan jejak ion yang terlihat. Sementara itu, foto emulsi memungkinkan untuk memperlihatkan jejak sinar radioaktif yang telah melewatinya.

Partikel yang lewat ini tidak langsung terlihat, namun jejak partikel tersebut bisa dilihat pada pelat fotografi yang akan menunjukkan jenis sinar yang lewat. Di sisi lain, detektor sintilasi menggunakan bahan yang memancarkan cahaya saat terkena radiasi. Cahaya yang dihasilkan oleh bahan sintilator ini memiliki intensitas yang sebanding dengan energi radiasi yang mengenai bahan tersebut. Alat pencacah sintilasi ini berfungsi untuk mengukur energi radiasi dari sinar radioaktif.

### Besaran-Besaran pada Radioaktivitas

#### a. Laju Peluruhan

Peristiwa pecahnya inti atom secara spontan dengan disertai radiasi sinar-sinar radioaktif disebut **peluruhan** (disintegrasi). Unsur radioaktif yang terus-menerus meluruh akan makin besar energi dan massanya berkurang. Laju peluruhan suatu unsur radioaktif menyatakan jumlah inti atom yang hilang dalam waktu tertentu.

Secara matematis, laju peluruhan dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

atau

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

Jika kedua ruas diintegrasikan, maka:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Keterangan rumus:

$N_0$  = jumlah inti atom mula-mula

$N$  = jumlah inti atom yang belum meluruh

$\lambda$  = konstanta peluruhan

$t$  = lamanya peluruhan

**b. Waktu Paruh (Half-Life)**

Waktu paruh adalah waktu yang dibutuhkan untuk jumlah inti radioaktif yang belum meluruh menjadi setengah dari jumlah mula-mula. Persamaan waktu paruh dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T = \frac{0.693}{\lambda}$$

**Dengan:**

$T$  = waktu paruh (s)

$\lambda$  = konstanta peluruhan ( $s^{-1}$ )

Dengan demikian, setelah melewati waktu  $t$  detik, jumlah inti yang tersisa (belum meluruh) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

Persamaan tersebut juga berlaku untuk menghitung massa zat radioaktif yang belum meluruh, dengan persamaan sebagai berikut:

$$m = m_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

Dimana:

$(m_0)$  = massa inti mula-mula (kg)

$(m)$  = massa inti yang belum meluruh (kg)

( $t$ ) = lama waktu peluruhan (s)

( $T$ ) = waktu paruh (s)

**c. Aktivitas Radioaktif ( $A$ )**

Aktivitas radioaktif adalah banyaknya kejadian peluruhan tiap detik. Aktivitas radioaktif diukur dalam satuan **Becquerel (Bq)**, yang setara dengan satu kejadian per detik.

Secara matematis, aktivitas radioaktif dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N$$

**Dengan:**

$A$  = aktivitas radioaktif (Bq)

$\lambda$  = konstanta peluruhan ( $s^{-1}$ )

$N$  = jumlah inti yang belum meluruh

**d. Umur Rata-Rata ( $\tau$ )**

Umur rata-rata suatu atom yang mengalami peluruhan adalah kebalikan dari konstanta peluruhan. Umur rata-rata dapat dihitung dengan persamaan:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

**e. Dosis Serap**

Dosis serap adalah banyaknya energi yang diserap oleh massa benda yang menyerap radiasi. Dosis serap dapat dinyatakan dengan rumus:

$$D = \frac{E_R}{m}$$

**Dengan:**

$D$  = dosis serap (J/kg, gray)

$E_R$  = energi radiasi (J)

$m$  = massa yang menyerap radiasi (kg)

**f. Intensitas Sinar Radioaktif**

Intensitas sinar radioaktif berkurang seiring dengan perjalanan sinar melalui bahan. Intensitas sinar yang diteruskan dapat dinyatakan dengan rumus:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

**Dengan:**

$I_0$  = intensitas sinar radioaktif mula-mula ( $W/m^2$ )

$I$  = intensitas sinar setelah melewati bahan ( $\text{W/m}^2$ )

$\mu$  = koefisien perlemahan ( $\text{m}^{-1}$ )

$x$  = ketebalan bahan (m)

Agar intensitas radiasi berkurang menjadi setengah dari nilai semula setelah melewati suatu benda, bahan tersebut harus memiliki ketebalan sebesar:

### Contoh Soal

Jelaskan bagaimana inti atom yang tidak stabil dapat menjadi stabil. Sebutkan juga jenis-jenis radiasi yang dapat dipancarkan oleh inti atom yang tidak stabil dan bagaimana pengaruhnya terhadap perubahan struktur inti.

#### Pembahasan:

Inti atom yang tidak stabil akan mengalami peluruhan radioaktif untuk mencapai kestabilan. Proses ini dapat menghasilkan berbagai jenis radiasi seperti sinar alpha ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), dan gamma ( $\gamma$ ).

- ▷ **Sinar Alpha ( $\alpha$ )** adalah partikel bermuatan positif yang terdiri dari dua proton dan dua neutron, yang dipancarkan saat inti atom terlalu berat.
- ▷ **Sinar Beta ( $\beta$ )** adalah partikel bermuatan negatif yang merupakan elektron yang dipancarkan ketika neutron dalam inti atom berubah menjadi proton.
- ▷ **Sinar Gamma ( $\gamma$ )** adalah gelombang elektromagnetik dengan energi sangat tinggi yang dipancarkan untuk menurunkan energi inti atom.

Radiasi ini membantu inti atom untuk mengurangi kelebihan energi atau massa, dan pada akhirnya membuatnya lebih stabil.

$$x = HVL = \frac{0,693}{\mu}$$

Dengan demikian, intensitas radiasi yang diteruskan melalui suatu benda dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$I = I_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{x}{HVL}}$$

Dimana:

(HVL) = setengah lapisan nilai (m)

(x) = ketebalan bahan (m)

( $I_0$ ) = intensitas sinar radioaktif mula-mula ( $\text{W/m}^2$ )

( $I$ ) = intensitas setelah melewati bahan ( $\text{W/m}^2$ )

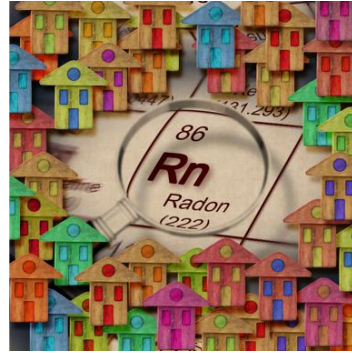
( $\mu$ ) = koefisien pelemahan ( $1/\text{m}$ )



## Fakta Fisika di Sekitarmu

### Radiasi Alami di Sekitar Kita!

Radiasi tidak selalu berbahaya! Beberapa unsur seperti karbon-14 secara alami memancarkan radiasi untuk menjadi stabil. Kita bahkan terpapar sedikit radiasi setiap hari dari sumber alami seperti radon dan pisang yang mengandung unsur radioaktif. Jadi, radiasi adalah bagian dari kehidupan sehari-hari kita!



Radon bisa ditemukan di lingkungan sekitar – Canva.com



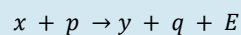
## 4. Proses Reaksi pada Inti Atom



Proses Reaksi Inti Atom – Canva.com

Pada pembahasan sebelumnya, kita telah mempelajari tentang reaksi-reaksi yang terjadi pada elektron dalam suatu atom. Lalu, apakah inti atom juga dapat mengalami reaksi? Apa saja jenis reaksi yang dapat terjadi pada inti atom? Bagaimanakah reaksi-reaksi tersebut dapat terjadi?

Pada umumnya, **reaksi inti** adalah proses yang terjadi ketika partikel-partikel inti saling bertumbukan atau kontak dengan partikel lainnya, seperti proton, neutron, deuteron, triton, helium-3, partikel alfa ( $\alpha$ ), dan partikel beta ( $\beta$ ). Reaksi-reaksi ini dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:



### Keterangan rumus:

x = inti mula-mula

p = partikel yang ditambahkan

y = inti akhir

q = partikel yang dipancarkan

E = energi yang dihasilkan

**Besar energi (E) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:**

$$E = [(m_x + m_p) - (m_y + m_q)]c^2$$

Jika satuan massa yang digunakan adalah sma, besar energi yang dipancarkan atau diserap dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$E = [(m_x + m_p) - (m_y + m_q)] \cdot 931, \text{MeV}$$

### Dengan keterangan:

(  $m_x$  ) = massa inti mula-mula (kg, sma)

(  $m_p$  ) = massa partikel yang ditambahkan (kg, sma)

(  $m_y$  ) = massa inti akhir (kg, sma)



(  $m_q$  ) = massa partikel yang dipancarkan (kg)

(  $c$  ) = kecepatan cahaya ( $3 \times 10^8$  m/s)

(  $E$  ) = energi yang dihasilkan (Joule atau MeV)

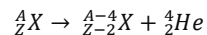
Berdasarkan persamaan di atas, jika (  $E$  ) bernilai positif, maka reaksi tersebut disebut reaksi eksotermik (menghasilkan energi). Sebaliknya, jika (  $E$  ) bernilai negatif, maka itu menunjukkan reaksi endotermik (menyerap energi).

Reaksi ini mengikuti hukum dasar fisika, yaitu hukum kekekalan massa dan energi, di mana jumlah massa dan jumlah momentum tetap konstan. Selain itu, kita juga mengamati kekekalan muatan dan hukum-hukum dasar lainnya dalam berbagai reaksi.

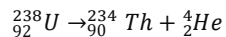
### Reaksi Peluruhan (Disintegrasi)

Peluruhan adalah proses pecahnya inti atom secara spontan dengan memancarkan sinar-sinar radioaktif alam, yaitu sinar-alpha ( $\alpha$ ), sinar-beta ( $\beta$ ), dan sinar-gamma ( $\gamma$ ). Karena terjadi secara alami, peluruhan ini disebut juga radioaktivitas alam.

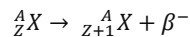
Jika inti atom memancarkan sinar- $\alpha$ , nomor atom berkurang 2 dan nomor massa berkurang 4, yang dinyatakan dengan persamaan:



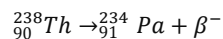
**Contoh:**



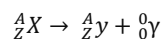
Sementara itu, jika inti atom memancarkan sinar- $\beta$ , nomor atom bertambah 1, tetapi nomor massa tetap dan dapat dinyatakan dengan persamaan:



**Contoh:**



Ketika inti atom memancarkan sinar-gamma, nomor atom dan nomor massa tetap, yang dapat dinyatakan dengan persamaan:



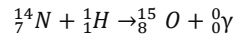
### Penembakan Inti Atom

Inti atom dapat ditembak oleh partikel-partikel yang berasal dari inti tersebut, tetapi memiliki kecepatan yang sangat tinggi. Partikel-partikel ini dapat dipercepat oleh alat pemercepat cepat yang disebut akselerator. Inti atom yang ditembakkan dapat digolongkan menjadi tiga kelompok, yaitu inti ringan dengan  $A \leq 40$ , inti pertengahan dengan  $40 < A \leq 100$ , dan inti berat dengan  $A > 100$ .

Penembakan pada inti atom ini akan menyebabkan terjadinya perubahan susunan pada inti atom yang dapat berupa:

### a. Transmutasi Inti

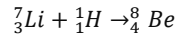
Transmutasi inti adalah peristiwa perubahan suatu inti atom menjadi inti baru yang stabil. Misalnya:



Ini adalah contoh transmutasi yang umum, di mana unsur nitrogen (N) menyerap proton dan menjadi unsur oksigen (O) bersama dengan pelepasan foton ( $\gamma$ ).

### b. Radioaktivitas Buatan

Radioaktivitas buatan adalah peristiwa perubahan suatu inti atom menjadi inti baru yang bersifat radioaktif (tidak stabil). Contohnya:



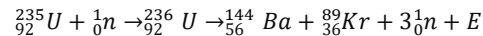
Ini menggambarkan bagaimana isotop litium (Li) bertumbukan dengan proton, menghasilkan beryllium (Be). Itu adalah contoh proses yang menghasilkan unsur yang lebih berat dan stabil.

Radioaktivitas buatan ini kemudian dimanfaatkan oleh para ilmuwan untuk membuat unsur-unsur buatan yang disebut **unsur transuranium**, yaitu unsur dengan nomor atom lebih besar dari 92 ( $Z > 92$ ).

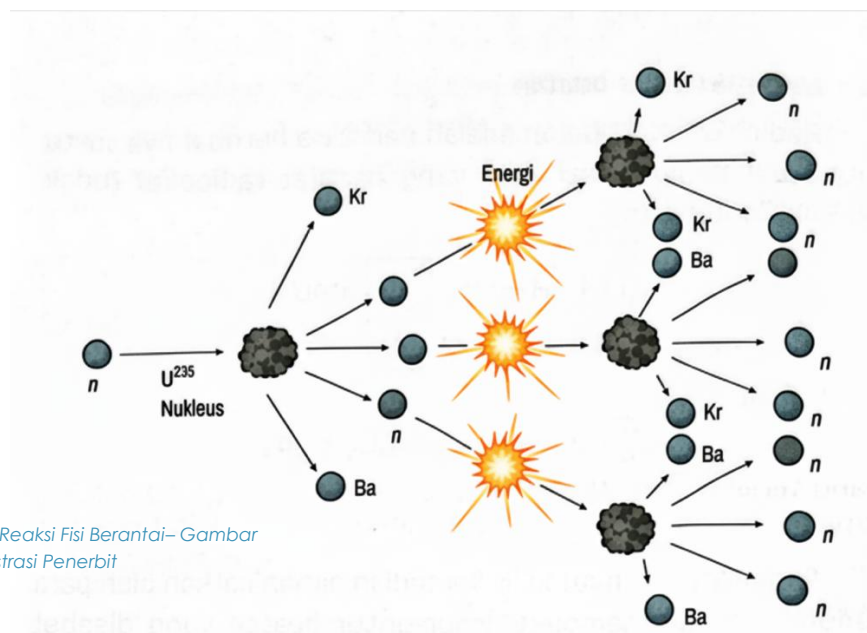
### c. Reaksi Fisi

Reaksi fisi adalah peristiwa pembelahan sebuah inti berat menjadi dua inti yang lebih kecil dengan pelepasan energi yang sangat besar. Pada reaksi fisi, yang menjadi partikel penembaknya adalah neutron, yang memiliki kecepatan tinggi dan tidak terpengaruh oleh medan listrik. Neutron ini menumbuk inti berat yang menghasilkan neutron lebih banyak dari neutron penembaknya. Dengan demikian, akan terjadi reaksi fisi yang berantai.

Salah satu contoh reaksi fisi adalah:



Reaksi fisi berantai dapat dikendalikan atau dikontrol pada suatu tempat yang disebut reaktor atom.



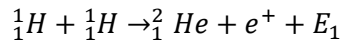
Skema Terjadinya Reaksi Fisi Berantai– Gambar  
Ilustrasi Penerbit

## Reaksi Fusi

Reaksi fusi adalah reaksi penggabungan inti atom ringan menjadi sebuah inti baru yang lebih berat dan diiringi dengan pelepasan energi yang sangat besar. Reaksi fusi terjadi di **Matahari** dan bintang-bintang serta pada ledakan bom hidrogen.

Reaksi fusi yang terjadi di Matahari disebut juga termonuklir. Reaksi ini mengubah atom hidrogen menjadi inti helium yang akan terus terjadi selama massa inti hidrogen cukup.

Tahapan reaksi fusi pada Matahari adalah sebagai berikut:



## Deret Radioaktif

Telah diketahui bahwa unsur-unsur yang bersifat radioaktif memiliki kecenderungan untuk membentuk unsur yang stabil. Dengan demikian, unsur tersebut akan terus-menerus memancarkan sinar-sinar radioaktif sampai menjadi unsur yang stabil. Dari berbagai unsur radioaktif, terdapat empat kelompok unsur radioaktif yang disebut **deret radioaktif**.

Tabel Deret Radioaktif

Nomor Massa	Nama Deret	Inti Induk	Waktu Paruh dalam Tahun	Produk Inti Akhir Stabil
$4n$	Torium	${}^{232}_{93}\text{Th}$	$1,39 \times 10^9$	${}^{208}_{82}\text{Pb}$
$4n + 1$	Neptunium	${}^{237}_{93}\text{Np}$	$4,25 \times 10^9$	${}^{209}_{83}\text{Bi}$
$4n + 2$	Uranium	${}^{238}_{92}\text{U}$	$4,51 \times 10^9$	${}^{206}_{82}\text{Pb}$
$4n + 3$	Aktinium	${}^{235}_{93}\text{U}$	$7,07 \times 10^9$	${}^{207}_{82}\text{Pb}$

Gambar Tabel Deret Radioaktif– Modul Fisika Kelas 12 KD 3.10 , Direktorat SMA, Kemendikbud

Tabel ini menunjukkan deret unsur radioaktif, nomor massa, nama deret, inti induk, waktu paruh dalam tahun, dan produk inti akhir stabil.

### Contoh Soal

Jelaskan jenis-jenis reaksi yang dapat terjadi pada inti atom dan berikan contoh masing-masing!

#### Pembahasan:

Reaksi pada inti atom meliputi:

1. **Peluruhan Alfa ( $\alpha$ ):** Inti memancarkan partikel alfa (2 proton dan 2 neutron), mengurangi nomor atom 2 dan nomor massa 4. Contoh: Uranium-238 ( ${}_{92}^{238}\text{U}$ ) yang berubah menjadi thorium-234 ( ${}_{90}^{234}\text{Th}$ )
2. **Peluruhan Beta ( $\beta$ ):** Inti memancarkan elektron (beta) dan nomor atom bertambah 1, sementara nomor massa tetap. Contoh: Thorium-238 ( ${}_{90}^{238}\text{Th}$ ) yang berubah menjadi protactinium-234 ( ${}_{91}^{234}\text{Pa}$ ).
3. **Peluruhan Gamma ( $\gamma$ ):** Inti memancarkan radiasi gamma, tetapi nomor atom dan nomor massa tetap. Sering terjadi setelah peluruhan alfa atau beta untuk menurunkan energi inti.



## 5. Penggunaan Teknologi Nuklir

Telah diketahui bahwa reaksi fisi berantai menghasilkan energi yang sangat besar. Jika reaksi ini tidak terkendali, energi yang dihasilkan dapat merusak segala sesuatu yang ada di sekitarnya. Namun, jika reaksi ini terkendali, energi yang dihasilkan dapat digunakan untuk berbagai keperluan, salah satunya sebagai **Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)**.

### Reaktor Atom

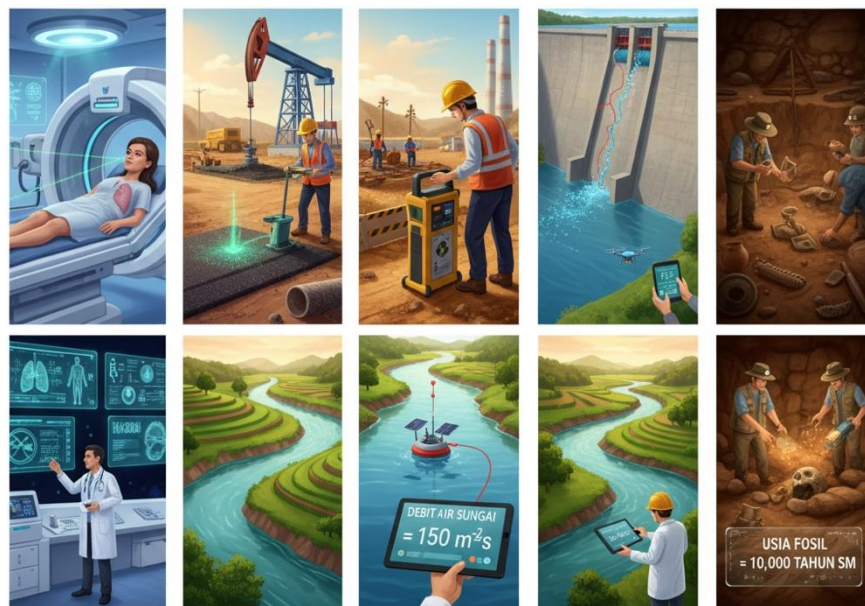
Reaktor atom pertama kali dibangun pada tahun 1942 di Chicago, Amerika Serikat oleh **Enrico Fermi**. Pada reaktor tersebut terdapat elemen bahan bakar sebagai bahan yang menghasilkan reaksi fisi dengan sumber energi nuklir. Bahan yang biasa digunakan adalah uranium-235, uranium-233, dan plutonium-239. Uranium-235 terdapat di alam bebas, sedangkan yang lainnya dibuat di laboratorium. Selain itu, terdapat reaktor yang berfungsi untuk membangkitkan bahan bakar.

Komponen-komponen lain reaktor atom, yaitu **moderator**, persial, dan batang pengontrol. Moderator berfungsi untuk memperlambat gerakan neutron, bahan moderator adalah air ( $H_2O$ ), air berat ( $D_2O$ ), dan grafit. Persial berfungsi untuk mengatur laju reaksi fisi agar tetap stabil, sedangkan batang pengontrol berfungsi untuk mengendalikan jumlah neutron yang beraksi dengan bahan bakar.

Berdasarkan kegunaannya, terdapat beberapa jenis reaktor atom, yaitu **reaktor tenaga (power reactor)**, **reaktor penelitian (research reactor)**, dan **reaktor pembangkit (converter reactor)**. Reaktor tenaga berfungsi untuk mengubah tenaga nuklir menjadi tenaga listrik. Pada reaktor ini, yang berfungsi sebagai moderator adalah air yang langsung digunakan. Setelah itu, uap tersebut akan menggerakkan generator.

Reaktor penelitian berfungsi untuk membuat zat-zat radioaktif. Energi yang dihasilkan pada reaktor ini digunakan untuk membuat radioisotop. Misalkan,  $^{60}_{27}Co$  yang merupakan sumber sinar- $\gamma$  dan sinar- $\beta$  yang sangat kuat. Sinar- $\gamma$  dapat digunakan untuk mensterilkan makanan, sedangkan sinar- $\beta$  untuk memvulkanisasi karet. Sementara itu, reaktor pengubah berfungsi untuk mengubah unsur yang terdapat di alam menjadi unsur pembangkit untuk reaktor-reaktor lain.

### Bidang Penggunaan Teknologi Nuklir



Bidang Penggunaan Teknologi Nuklir Saat Ini – Gambar Ilustrasi Penerbit

Teknologi nuklir memiliki peran dalam berbagai bidang, seperti:

**a. Bidang Kedokteran:**

Teknologi nuklir digunakan untuk mendiagnosis penyakit dan terapi radiasi untuk pengobatan kanker.

**b. Industri:**

Teknologi nuklir dimanfaatkan untuk eksplorasi minyak dan gas, dan dalam bidang konstruksi digunakan untuk mengukur kelembaban tanah, aspal, serta beton.

**c. Tracer:**

Teknologi nuklir juga dimanfaatkan sebagai tracer, yaitu untuk mengetahui kebocoran suatu bendungan.

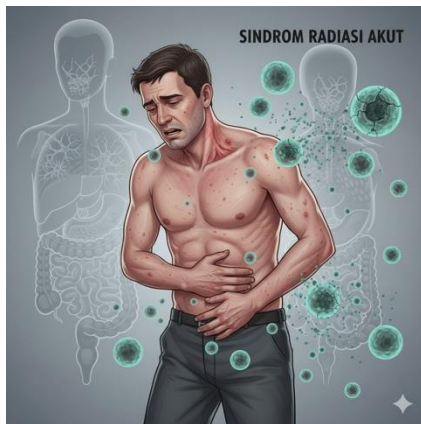
**d. Pengairan:**

Dalam bidang pengairan, teknologi ini digunakan untuk menentukan debit air sungai.

**e. Arkeologi:**

Dalam bidang arkeologi, teknologi nuklir digunakan untuk menentukan umur fosil.

### Dampak Teknologi Nuklir



Walaupun teknologi nuklir memiliki banyak manfaat, tetapi juga memiliki dampak buruk terhadap kehidupan manusia. Misalnya, jika tubuh manusia terpapar radiasi nuklir dengan dosis tinggi, maka akan mengakibatkan sindrom radiasi akut. Selain itu, dampak buruk dari radiasi nuklir terhadap kesehatan tubuh manusia adalah merusak sel-sel tubuh yang dapat menyebabkan kanker darah, kanker paru, kanker kulit, hingga kerusakan jaringan kulit.

*Dampak Teknologi Nuklir – Gambar  
Ilustrasi Penerbit*

### Contoh Soal

Jelaskan apa yang terjadi jika reaksi fisi berantai tidak terkendali dan sebutkan salah satu manfaat positif dari reaksi ini!

**Pembahasan:**

Jika reaksi fisi berantai tidak terkendali, energi yang dihasilkan dapat merusak segala sesuatu yang ada di sekitarnya, seperti pada kecelakaan nuklir. Namun, jika reaksi ini terkendali, energi yang dihasilkan dapat digunakan sebagai **Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)**, yang menghasilkan energi listrik untuk keperluan sehari-hari.

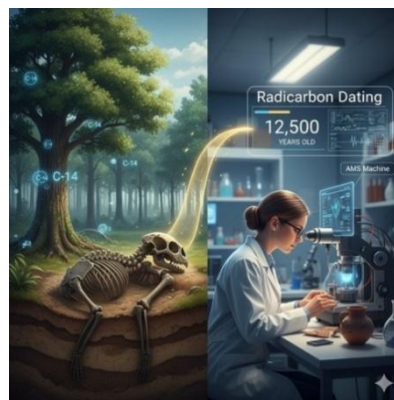




## Fakta Fisika di Sekitarmu

### Nuklir dalam Arkeologi – Mengungkap Sejarah!

Tahukah kamu, teknologi nuklir digunakan untuk menentukan umur fosil dan artefak kuno? Pada tahun 1949, Willard Libby menggunakan radiokarbon dating untuk mengukur usia benda purbakala, membuka pintu bagi para arkeolog untuk mempelajari sejarah manusia lebih dalam. Dengan teknologi ini, kita bisa mengetahui berapa usia fosil yang ditemukan dan mengungkap misteri peradaban kuno!



Teknologi Nuklir untuk Bidang Arkeolog  
– Gambar Ilustrasi Penerbit

## Kegiatan Praktikum

**Topik:** Radioaktif

**Tujuan:**

Mengidentifikasi jenis sinar radioaktif yang dipancarkan oleh suatu unsur.

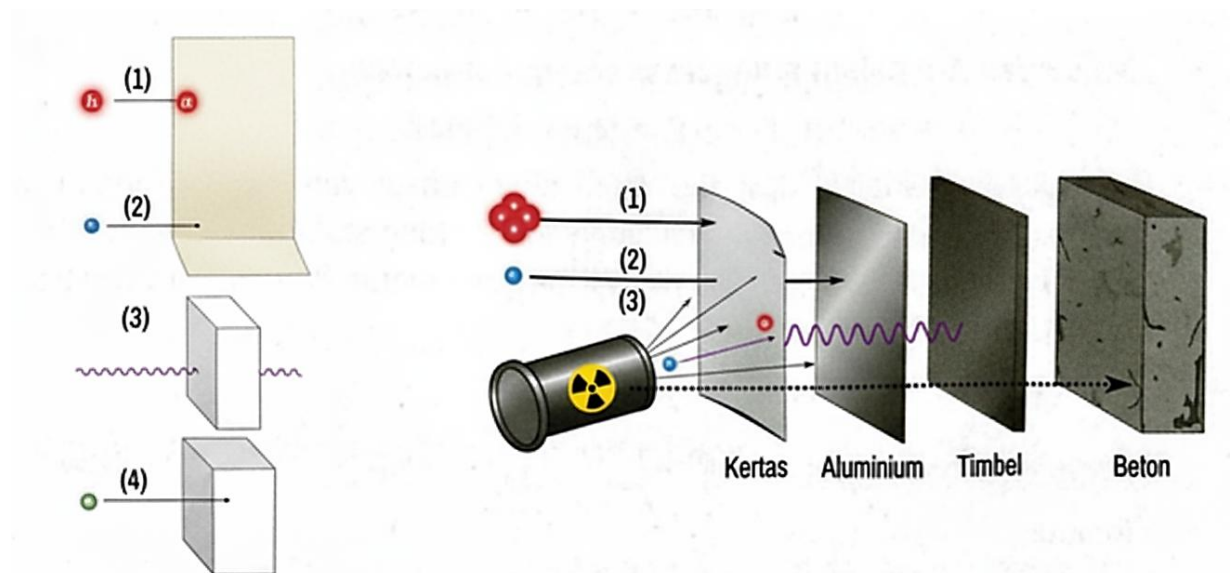
Menentukan daya ionisasi dan daya tembus sinar radioaktif tersebut.

**Instruksi Kerja:**

Lakukan percobaan ini bersama kelompokmu dengan saling bekerja sama.

Perhatikan gambar berikut yang menunjukkan berbagai jenis materi penghalang sinar radioaktif.

**Gambar:**



Ket. Gambar: (1) Kertas, (2) Aluminium, (3) Timbel, (4) Beton.



**Instruksi dan pertanyaan:**

1. Berdasarkan gambar tersebut, analisis dengan kritis jenis sinar radioaktif yang dapat dipancarkan melalui media (1), (2), (3), dan (4).
2. Analisis daya tembus serta daya ionisasi dari masing-masing jenis sinar tersebut, apakah mereka berbeda dalam hal penetrasi material.
3. Dalam laporan percobaan, buatlah presentasi PowerPoint yang berisi hasil analisis dan diskusi kelompokmu, lalu presentasikan di depan kelas.
4. Bagaimana pengaruh jenis bahan penghalang terhadap intensitas radiasi yang diterima?
5. Apakah ada jenis material lain yang lebih efektif dalam menyaring radiasi? Jelaskan berdasarkan eksperimen yang dilakukan.

## Rangkuman

### 1) Struktur Penyusun Atom

Atom adalah partikel terkecil yang membentuk materi di alam semesta. Berdasarkan teori Dalton, atom adalah partikel yang tidak dapat dibagi lagi. Namun, penemuan ilmuwan selanjutnya mengungkap bahwa atom terdiri dari subpartikel lebih kecil, yaitu elektron, proton, dan neutron.

### 2) Struktur Inti Atom

Inti atom terdiri dari proton dan neutron yang tersusun di pusat atom, sementara elektron mengelilinginya. Proton bermuatan positif dan neutron netral. Nomor atom ( $Z$ ) menunjukkan jumlah proton, dan nomor massa ( $A$ ) adalah jumlah proton dan neutron dalam inti atom.

### 3) Proses Radioaktivitas

Radioaktivitas adalah proses di mana inti atom yang tidak stabil memancarkan radiasi (sinar  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) untuk mencapai kestabilan. Pada peluruhan alfa, nomor atom berkurang dua, pada peluruhan beta bertambah satu, dan peluruhan gamma tidak mengubah nomor atom atau nomor massa.

### 4) Proses Reaksi pada Inti Atom

Reaksi inti melibatkan pertemuan antara partikel inti (proton, neutron, dll) yang dapat menghasilkan perubahan dalam struktur inti atom, seperti transmutasi atau radioaktivitas buatan. Reaksi fisika inti dapat menghasilkan energi besar, seperti pada reaksi fisi dan fusi.

### 5) Penggunaan Teknologi Nuklir

Teknologi nuklir memiliki banyak manfaat, terutama dalam bidang energi, kesehatan, dan industri. Reaksi fisi digunakan dalam reaktor nuklir untuk menghasilkan listrik, sementara reaksi fusi terjadi di Matahari dan bintang. Teknologi nuklir juga digunakan dalam pengobatan dan untuk mendiagnosis penyakit.

### Latihan Soal

1. Partikel yang dipancarkan saat peluruhan radioaktif jenis alfa adalah ...
  - A. Positron
  - B. Neutron
  - C. Proton
  - D. Elektron
  - E. Inti helium
2. Proses penggabungan dua inti atom ringan menjadi inti atom yang lebih berat disertai dengan pelepasan energi yang besar disebut ...
  - A. Fusi
  - B. Fisi
  - C. Peluruhan alfa
  - D. Peluruhan beta
  - E. Radioaktivitas
3. Jika nomor atom suatu unsur bertambah satu, tetapi nomor massa tetap, jenis peluruhan yang terjadi adalah ...
  - A. Sinar gamma
  - B. Sinar alfa
  - C. Sinar beta
  - D. Neutron
  - E. Positron
4. Urutan dari daya tembus sinar radioaktif yang paling besar hingga yang paling kecil adalah ...
  - A. Sinar alfa, sinar beta, dan sinar gamma
  - B. Sinar gamma, sinar beta, dan sinar alfa
  - C. Sinar beta, sinar alfa, dan sinar gamma
  - D. Sinar beta, sinar gamma, dan sinar alfa
  - E. Sinar alfa, sinar gamma, dan sinar beta
5. Jika waktu paruh suatu bahan radioaktif adalah 5 jam, berapa lama waktu yang dibutuhkan agar jumlah inti bahan tersebut berkurang 87,5%?
  - A. 2,5 jam
  - B. 3,0 jam
  - C. 3,5 jam
  - D. 4,0 jam
  - E. 4,5 jam

6. Peluruhan yang menyebabkan perubahan proton dalam inti atom menjadi neutron disebut ...
- A. Peluruhan alfa
  - B. Peluruhan beta positif
  - C. Peluruhan gamma
  - D. Peluruhan beta negative
  - E. Reaksi fusi
7. Jenis reaksi yang terjadi pada reaktor atom untuk menghasilkan energi listrik adalah ...
- A. Fusi
  - B. Fisi
  - C. Radioaktivitas
  - D. Transmutasi
  - E. Pembelahan inti

Akses latihan soal  
lainnya di sini yuk!



Latihan Soal Fisika  
Kelas 12 BAB 8

## Referensi

- Becquerel, A. H. (1896). *Radiasi dari bahan radioaktif*. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 122, 501-502.
- Curie, M., & Curie, P. (1898). *Tentang suatu zat radioaktif baru yang terdapat dalam pechblende*. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 127, 1215-1217.
- Rutherford, E., & Geiger, H. (1908). *Deteksi partikel alfa yang dipancarkan oleh uranium*. [Tesis doctoral]. Universitas Manchester.
- Moseley, H. G. J. (1913). *Nomor atom unsur-unsur*. Nature, 91(2277), 1-3.
- Fermi, E. (1942). *Reaktor nuklir*. American Journal of Physics, 10(6), 85-93.
- Einstein, A. (1905). *Apakah inersia tubuh bergantung pada konten energinya?* Annalen der Physik, 18, 639-643.
- Sundararajan, V., & Santhanam, P. (2017). *Struktur atom dan radiasi*. Journal of Physics Education, 35(2), 34-40.
- Modul Fisika Kelas 12 KD 3.10, Direktorat SMA, Kemendikbud.
- Wikipedia contributors. (2025, September). *Radioaktivitas*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. <https://id.wikipedia.org/wiki/Radioaktivitas>
- Wikipedia contributors. (2025, September). *Fisika nuklir*. Wikipedia, The Free Encyclopedia. [https://id.wikipedia.org/wiki/Fisika\\_nuklir](https://id.wikipedia.org/wiki/Fisika_nuklir)



# BAB 9: DUNIA TEKNOLOGI DIGITAL

## Karakter Pelajar Pancasila

**Bergotong royong:** Siswa dapat bekerja sama dalam menganalisis teknologi digital.

**Bernalar kritis dan kreatif:** Siswa mampu mengkritisi dan merancang solusi teknologi.

**Mandiri:** Siswa dapat menggunakan teknologi digital dengan percaya diri untuk berbagai kebutuhan.

**Kata Kunci:** Bilangan biner, Gerbang logika, Komputer, Serat optik, Sistem bilangan, Transmisi data

**Tujuan Pembelajaran: Pemanfaatan Teknologi Digital dalam Komunikasi dan Pengolahan Data**

### 1. Memahami peran teknologi digital dalam komunikasi data

- ▷ Teknologi digital memungkinkan pertukaran data yang cepat dan efektif dalam kehidupan sehari-hari.
- ▷ Penggunaan teknologi ini terlihat di berbagai bidang seperti komunikasi, kesehatan, dan pendidikan.

### 2. Mengenal konsep penyimpanan dan transmisi data

- ▷ Sistem analog dan digital memiliki perbedaan dalam cara menyimpan dan mentransmisikan data.
- ▷ Penerapan sistem transmisi digital seperti serat optik mempercepat proses pengiriman data.

### 3. Mengerti penerapan gerbang logika dalam teknologi

- ▷ Gerbang logika mengubah instruksi menjadi sinyal elektronik dalam perangkat digital.
- ▷ Digunakan dalam perangkat seperti komputer dan ponsel untuk pengambilan keputusan.

#### **4. Menganalisis aspek kuantitatif dalam teknologi digital**

- ▷ Pemahaman tentang pengukuran teknologi digital seperti bandwidth dan kecepatan data sangat penting.
- ▷ Analisis ini membantu mengoptimalkan kinerja sistem digital dalam kehidupan sehari-hari.



F I T R I





## 1. Evolusi Komputer dalam Era Digital

Pernahkah kamu membayangkan seperti apa bentuk komputer pertama di dunia? Apakah komputer selalu sekecil laptop atau smartphone yang kamu pakai sekarang? Faktanya, komputer mengalami perkembangan luar biasa dari waktu ke waktu — mulai dari sebesar ruangan, hingga sekecil chip. Pada bagian ini, kamu akan mempelajari bagaimana komputer berevolusi melalui lima generasi utama, dan bagaimana setiap lompatan teknologi membawa perubahan besar dalam cara manusia berinteraksi dengan informasi dan data. Yuk, kita mulai perjalanan mengenal komputer dari generasi pertama hingga komputer modern saat ini!

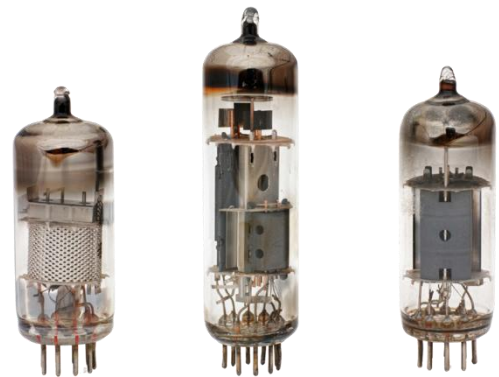


*Perbedaan Bentuk Komputer Dahulu dan Komputer Saat Ini – Canva.com*

### Generasi Pertama

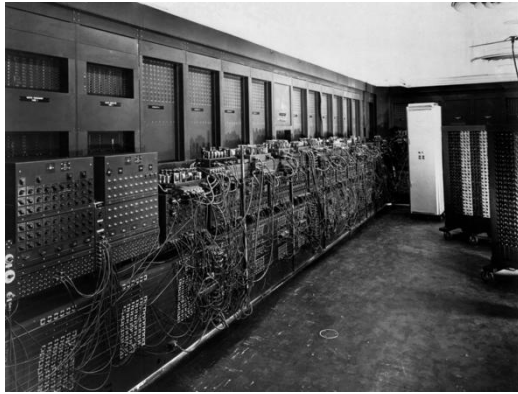
Komputer generasi pertama muncul pada tahun 1940-an dan menjadi tonggak awal dalam sejarah perkembangan teknologi komputer. Ciri khas utama komputer generasi ini adalah penggunaan tabung vakum (vacuum tube) sebagai komponen utama untuk menyimpan dan memproses data serta menjalankan perintah.

Tabung vakum bekerja dengan cara mengatur aliran elektron dalam ruang hampa udara untuk memperkuat sinyal listrik. Meskipun tabung vakum memungkinkan komputer untuk melakukan perhitungan otomatis, penggunaannya menimbulkan berbagai kendala seperti ukuran fisik yang besar, panas berlebih, serta konsumsi daya listrik yang sangat tinggi.



*Tabung Vakum – Canva.com*

Salah satu contoh komputer generasi pertama yang terkenal adalah ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer), yang dikembangkan pada tahun 1946. ENIAC memiliki bobot sekitar 30 ton, panjang 30 meter, dan tinggi 2,4 meter. ENIAC menggunakan ribuan tabung hampa dan kabel, serta memerlukan daya listrik yang sangat besar untuk beroperasi. Program dalam ENIAC ditulis menggunakan bahasa mesin (machine language) dengan sistem bilangan biner, yaitu "0" dan "1".



ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer)– Canva.com

Komputer ini belum memiliki penyimpanan sekunder dan hanya menggunakan RAM (Random Access Memory) yang sangat terbatas. Komputer lainnya dari generasi ini adalah IAS (Computer of Institute for Advanced Studies), yang merupakan komputer berbasis stored program. IAS sudah memiliki memori utama untuk menyimpan data dan instruksi, serta dilengkapi dengan Arithmetic Logic Unit (ALU) dan Control Unit yang memungkinkan interpretasi dan eksekusi instruksi secara lebih terstruktur.

Walau terbatas, komputer generasi pertama memiliki peran penting dalam membuka jalan bagi perkembangan komputer selanjutnya.

## Generasi Kedua

Komputer generasi kedua dikembangkan pada awal tahun 1950-an hingga pertengahan 1960-an. Perubahan utama pada generasi ini adalah penggantian tabung vakum dengan transistor. Transistor merupakan komponen semikonduktor yang berfungsi sebagai penguat sinyal dan saklar elektronik.

Penggunaan transistor menjadikan komputer lebih kecil secara fisik, lebih efisien dalam penggunaan energi, dan tidak menghasilkan panas berlebih seperti tabung vakum. Hal ini memungkinkan komputer ditempatkan di ruangan yang lebih kecil dan mudah dipindahkan.

Komputer generasi kedua juga mengalami kemajuan dalam bahasa pemrograman, dengan mulai digunakannya bahasa tingkat tinggi seperti FORTRAN dan COBOL. Bahasa ini membuat pemrograman menjadi lebih mudah dan efisien.

Perangkat penyimpanan juga mengalami perkembangan dengan diperkenalkannya memori magnetik yang lebih andal dan cepat dibandingkan metode sebelumnya. Komputer generasi ini juga sudah mendukung perangkat input-output seperti keyboard dan layar, serta mulai digunakan secara komersial oleh perusahaan dan lembaga pemerintah.

Contoh komputer generasi kedua yang terkenal adalah IBM 1401 dan IBM 7090. Keduanya digunakan secara luas untuk pengolahan data bisnis dan ilmiah.

## Generasi Ketiga

Komputer generasi ketiga mulai dikembangkan sekitar tahun 1960-an hingga awal 1970-an. Generasi ini ditandai dengan munculnya teknologi Integrated Circuit (IC) atau sirkuit terpadu. IC adalah chip kecil yang menggabungkan berbagai komponen elektronik, termasuk transistor, resistor, dan kapasitor, menjadi satu kesatuan dalam kemasan mini.



IBM 1440 – Wikipedia



IBM System/360 – Wikipedia

Penggunaan IC memberikan efisiensi tinggi dalam pemrosesan data dan memungkinkan penghematan ruang yang signifikan. Komputer menjadi lebih kecil, lebih ringan, dan hemat energi, namun dengan kemampuan pemrosesan yang jauh lebih tinggi dibandingkan generasi sebelumnya.

Kemajuan lainnya adalah kemampuan menjalankan program secara multitasking (simultan), serta munculnya bahasa pemrograman baru seperti Pascal dan BASIC. Contoh komputer generasi ketiga adalah IBM System/360, yang mampu menjalankan berbagai jenis aplikasi dari bisnis hingga ilmiah.

Dengan efisiensi dan fleksibilitasnya, komputer generasi ketiga menjadi lebih mudah diakses dan mulai banyak digunakan dalam berbagai bidang.

### Generasi Keempat



Apple II – Wikipedia

Komputer generasi keempat berkembang sekitar tahun 1970-an hingga pertengahan 1980-an. Ciri utama generasi ini adalah penggunaan mikroprosesor sebagai pusat pemrosesan utama atau "otak" komputer. Mikroprosesor menggabungkan CPU ke dalam satu chip tunggal, menjadikannya lebih hemat ruang dan energi.

Komputer menjadi semakin kecil, cepat, dan lebih terjangkau. Perangkat penyimpanan juga mengalami perkembangan dengan adanya floppy disk dan hard drive, yang memungkinkan penyimpanan dan pengaksesan data dalam jumlah besar.

Pada masa ini juga lahir komputer pribadi atau personal computer (PC), seperti Apple II dan IBM PC, yang dijual secara massal kepada masyarakat umum.

Selain itu, muncul juga antarmuka pengguna grafis (GUI) yang memungkinkan interaksi visual dengan komputer melalui ikon dan mouse. Salah satu yang paling terkenal adalah Macintosh dari Apple. Bahasa pemrograman seperti C, C++, dan Pascal juga berkembang di masa ini.

Di sisi jaringan, komputer generasi keempat menandai lahirnya teknologi TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol), yang menjadi dasar pengembangan internet.



IBM PC – Wikipedia

### Generasi Kelima

Komputer generasi kelima merupakan komputer modern yang kita gunakan saat ini dan masih terus berkembang. Generasi ini ditandai dengan kemampuan menampilkan grafik dan gambar yang tajam, serta kemampuan memproses data dengan cepat dan akurat.

Fokus utama pada komputer generasi ini adalah pengembangan kecerdasan buatan atau Artificial Intelligence (AI). AI memungkinkan komputer untuk berpikir, memahami bahasa alami, memecahkan masalah, dan bahkan belajar dari pengalaman melalui machine learning.

AI telah menggantikan banyak pekerjaan manusia dan digunakan dalam berbagai bidang seperti otomasi industri, asisten virtual, pengenalan suara, dan mobil otonom.

Untuk meningkatkan kinerja, komputer generasi kelima juga menggunakan pemrosesan paralel yang memungkinkan beberapa CPU bekerja bersamaan. Selain itu, dikembangkan pula jaringan saraf tiruan (neural networks), yaitu model matematis yang meniru cara kerja otak manusia. Setiap aspek perkembangan komputer generasi kelima menekankan efisiensi, keterjangkauan, dan kemudahan penggunaan. Komputer masa kini tidak hanya canggih, tetapi juga mudah dijangkau oleh masyarakat luas.

### Contoh Soal

Jelaskan perbedaan utama antara komputer generasi kedua dan generasi ketiga, baik dari segi teknologi yang digunakan maupun dampaknya terhadap efisiensi komputer!

#### Pembahasan:

Komputer generasi kedua menggunakan transistor sebagai pengganti tabung vakum. Transistor membuat komputer menjadi lebih kecil, lebih hemat energi, dan lebih cepat dibanding generasi pertama. Namun, setiap komponen masih dipasang secara terpisah sehingga ukuran perangkat tetap besar jika dibandingkan dengan teknologi masa kini.

Sementara itu, komputer generasi ketiga menggunakan Integrated Circuit (IC) atau chip, yang menggabungkan banyak komponen elektronik ke dalam satu kemasan kecil. Penggunaan IC menjadikan komputer generasi ketiga jauh lebih kecil, lebih cepat, lebih hemat energi, dan mampu menjalankan beberapa program secara bersamaan (multitasking). Efisiensi inilah yang membuat generasi ketiga menjadi tonggak penting dalam miniaturisasi dan peningkatan performa komputer.



### Fakta Fisika di Sekitarmu

#### Komputer pertama di dunia, ENIAC, beratnya lebih dari 30 ton!

Ukurannya sebesar satu ruangan kelas dan hanya bisa menghitung operasi matematika dasar.

Sekarang, komputer dalam genggamamu—seperti smartphone—mampu menyimpan ribuan foto, menjalankan aplikasi canggih, bahkan menggunakan kecerdasan buatan. Hebatnya, ponsel pintar saat ini jauh lebih cepat, hemat energi, dan seribu kali lebih kuat daripada ENIAC.

Ini membuktikan bagaimana teknologi berkembang dari ukuran besar dan rumit menjadi kecil, pintar, dan efisien.



*Komputer Pertama di Dunia – Wikipedia*





## 2. Sistem Transmisi Data dan Informasi

Dalam dunia modern saat ini, kita terbiasa dengan pengiriman data secara cepat melalui berbagai perangkat digital seperti ponsel, komputer, hingga satelit. Namun, tahukah kamu bagaimana sebenarnya data itu dikirim dari satu perangkat ke perangkat lainnya? Proses tersebut dikenal sebagai transmisi data. Transmisi data adalah proses pengiriman sinyal informasi dari sumber ke penerima melalui berbagai media, baik yang menggunakan kabel maupun nirkabel. Subbab ini akan membahas secara lengkap berbagai jenis media transmisi data yang umum digunakan.

### Spektrum Frekuensi Gelombang untuk Transmisi Data

Pada sistem transmisi data, kecepatan dan jangkauan pengiriman sinyal sangat dipengaruhi oleh frekuensi gelombang yang digunakan. Semakin tinggi frekuensi, semakin besar pula kapasitas data yang dapat ditransmisikan. Tabel berikut menunjukkan spektrum gelombang elektromagnetik yang umum digunakan dalam sistem transmisi data digital maupun analog:

Frekuensi Band	Nama
3–10 kHz	ELF (Extremely Low Frequency)
10–30 kHz	VLF (Very Low Frequency)
30–300 kHz	LF (Low Frequency)
300 kHz–3 MHz	MF (Medium Frequency)
3–30 MHz	HF (High Frequency)
30–300 MHz	VHF (Very High Frequency)
300 MHz–3 GHz	UHF (Ultra High Frequency)
3–30 GHz	SHF (Super High Frequency)

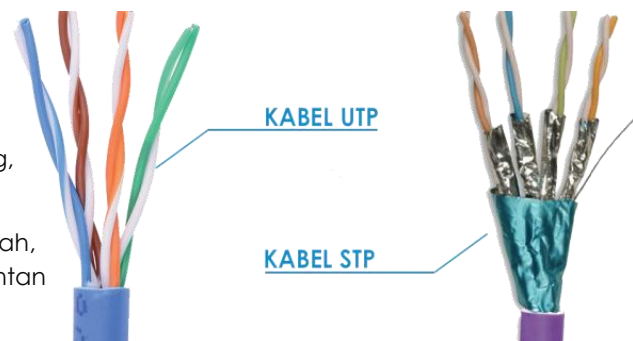
### Kabel Pasangan Terpilin (Twisted Pair Cable)

Kabel pasangan terpilin terdiri dari dua kawat tembaga yang dipilin membentuk spiral, kemudian dilapisi bahan isolator. Tujuan pemilinan ini adalah untuk mengurangi gangguan elektromagnetik dari luar. Kabel jenis ini banyak digunakan pada kabel telepon dan jaringan LAN.

Terdapat dua jenis utama twisted pair:

- ▷ **UTP (Unshielded Twisted Pair)** : tanpa pelindung tambahan, lebih murah.
- ▷ **STP (Shielded Twisted Pair)** : memiliki pelindung, lebih tahan gangguan.

Keunggulan dari kabel pasangan terpilin biaya murah, instalasi mudah. Namun, kekurangannya rentan terhadap gangguan dan jarak jangkauan terbatas.



contoh kabel LAN UTP/STP  
– gudangteknik.id

### Kabel Koaksial (Coaxial Cable)

Kabel koaksial terdiri atas satu konduktor pusat yang dikelilingi oleh isolator, kemudian dibungkus oleh konduktor kedua berupa anyaman kawat logam, dan dilapisi bahan pelindung luar. Struktur berlapis ini membuat kabel koaksial tahan terhadap gangguan luar.

Kabel ini banyak digunakan untuk siaran televisi, jaringan broadband, dan transmisi data berfrekuensi tinggi ( $> 300$  kHz).

Kelebihan dari kabel ini yaitu tahan gangguan, bandwidth lebih besar. Namun kekurangan dari kabel ini harga lebih mahal dibanding twisted pair.



*Penampang kabel koaksial – Canva.com*

### Kabel Serat Optik (Fiber Optic Cable)

Kabel serat optik terbuat dari serat kaca atau plastik yang sangat tipis dan fleksibel. Data dikirim melalui media ini dalam bentuk gelombang cahaya yang dipantulkan di dalam inti (core) serat. Proses ini mengikuti prinsip pemantulan total dalam optik.

Struktur utama serat optik:

- Core: pusat tempat cahaya merambat.
- Cladding: pembungkus inti dengan indeks bias lebih rendah.
- Coating: lapisan pelindung dari goresan atau kerusakan.
- Kelebihan: sangat cepat, ringan, tahan interferensi, bandwidth besar.
- Kekurangan: biaya pemasangan tinggi, memerlukan alat khusus.
- Gambar yang bisa digunakan: Serat optik dengan jalur cahaya dan panah pantulan total.

### Gelombang Mikro (Microwave Transmission)

Gelombang mikro digunakan untuk mengirim data melalui udara dalam bentuk gelombang elektromagnetik dengan frekuensi tinggi (300 MHz – 300 GHz). Komunikasi ini membutuhkan garis pandang langsung (line-of-sight) dan biasanya menggunakan antena parabola. Gelombang mikro memiliki kelebihan dapat mentransmisikan data dalam jumlah besar jarak jauh, sedangkan Kekurangannya terpengaruh cuaca, memerlukan peralatan khusus.



*2 menara pemancar – Gambar Ilustrasi Penerbit*

## Gelombang Radio (Radio Wave Transmission)



Transmisi data menggunakan gelombang radio mirip dengan gelombang mikro, namun frekuensinya lebih rendah (30 MHz – 3 GHz) dan tidak memerlukan garis pandang langsung. Gelombang radio dapat menyebar ke segala arah dan digunakan dalam siaran radio, televisi, serta Wi-Fi. Kelebihannya jangkauan luas, tidak memerlukan parabola. Namun kekurangannya sensitif terhadap interferensi dan cuaca.

*Antena pemancar memancarkan gelombang ke segala arah.– Gambar Ilustrasi Penerbit*

## Transmisi Satelit (Satellite Communication)

Transmisi satelit memungkinkan pengiriman data ke seluruh dunia dengan memantulkan sinyal dari stasiun bumi ke satelit yang mengorbit, lalu kembali ke stasiun tujuan. Salah satu teknologi yang digunakan adalah **Direct Broadcast Satellite (DBS)** dengan sistem **Very Small Aperture Terminal (VSAT)** untuk menekan biaya.

Kelebihan dari transmisi satelit mencakup area sangat luas, cocok untuk wilayah terpencil. Namun, Kekurangannya yakni biaya mahal, ada jeda waktu karena jarak sinyal.

### Contoh Soal

Jelaskan perbedaan prinsip kerja antara kabel serat optik dan kabel koaksial dalam proses transmisi data, serta sebutkan kelebihan utama dari kabel serat optik dibandingkan kabel koaksial!

#### Pembahasan:

Kabel koaksial dan kabel serat optik memiliki prinsip kerja yang berbeda dalam proses transmisi data. Kabel koaksial mentransmisikan data dalam bentuk sinyal listrik yang dialirkan melalui konduktor tembaga di bagian tengah kabel. Sinyal ini dilindungi oleh lapisan isolator dan anyaman logam yang berfungsi meredam gangguan elektromagnetik dari luar. Sementara itu, kabel serat optik bekerja dengan cara mengirimkan data dalam bentuk gelombang cahaya melalui inti serat kaca atau plastik. Cahaya tersebut dipantulkan secara total di dalam inti serat (core), mengikuti prinsip pemantulan total dalam optik sesuai hukum Snellius.

Dibandingkan dengan kabel koaksial, kabel serat optik memiliki sejumlah keunggulan utama. Kabel ini mampu mentransmisikan data dalam jumlah besar dengan kecepatan yang sangat tinggi karena memiliki bandwidth yang lebih besar. Selain itu, karena menggunakan cahaya sebagai media transmisi, kabel serat optik tidak mudah terganggu oleh interferensi elektromagnetik. Jangkauan transmisi kabel serat optik juga lebih jauh tanpa mengalami degradasi sinyal yang signifikan. Oleh karena itu, kabel serat optik lebih unggul dalam hal efisiensi, kecepatan, dan kualitas transmisi data jarak jauh.





### 3. Sistem Representasi Bilangan dalam Transmisi Data



*Pesan digital dapat dikirim melalui jaringan dan diterima dalam bentuk yang bisa dibaca.– Gambar Ilustrasi Penerbit*

Pernahkah kamu berpikir bagaimana pesan digital dapat dikirim melalui jaringan dan diterima dalam bentuk yang bisa dibaca? Ketika pesan dikirim melalui perangkat seperti ponsel, data tersebut akan terlebih dahulu diubah menjadi bentuk bilangan tertentu sebelum ditransmisikan, lalu diubah kembali menjadi bentuk asli di sisi penerima. Sistem bilangan menjadi bagian penting dalam proses ini karena digunakan untuk mewakili data secara numerik dalam sistem komputer.

Ada empat sistem bilangan yang umum digunakan dalam transmisi data, yaitu:

- Sistem bilangan desimal (basis 10)
- Sistem bilangan biner (basis 2)
- Sistem bilangan oktal (basis 8)
- Sistem bilangan heksadesimal (basis 16)

#### Sistem Bilangan Desimal

Sistem bilangan desimal merupakan sistem yang paling umum digunakan dalam kehidupan sehari-hari, berbasis 10, dan menggunakan 10 simbol, yaitu 0 hingga 9. Setiap angka dalam bilangan desimal memiliki nilai tempat berdasarkan pangkat dari 10, yang disebut sebagai radiks atau basis.

##### Contoh:

Bilangan 1257 dapat ditulis sebagai:

$$\begin{aligned} 1257_{10} &= 1 \times 10^3 + 2 \times 10^2 + 5 \times 10^1 + 7 \times 10^0 \\ &= 1000 + 200 + 50 + 7 \end{aligned}$$

#### Sistem Bilangan Biner

Sistem bilangan biner menggunakan basis 2 dan hanya terdiri dari dua simbol, yaitu 0 dan 1. Sistem ini menjadi dasar bagi semua perhitungan digital dan komputer karena kesederhanaannya dalam representasi sinyal (ON/OFF).

Setiap digit biner disebut bit (binary digit), dan 8 bit membentuk 1 byte.

##### Contoh:

Bilangan biner  $1010_2$  dapat dikonversi ke desimal sebagai berikut:

$$\begin{aligned} 1010_2 &= 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 \\ &= 8 + 0 + 2 + 0 \\ &= 10 \end{aligned}$$

## Sistem Bilangan Oktal

Sistem bilangan oktal berbasis 8 dan menggunakan delapan simbol dari 0 sampai 7. Kelebihan sistem ini adalah dapat memadatkan representasi biner karena setiap digit oktal setara dengan 3 digit biner. Hal ini membuat sistem oktal lebih efisien untuk penyimpanan dan representasi data dalam komputer.

Contoh:

$$\begin{aligned} 2157_8 &= 2 \times 8^3 + 1 \times 8^2 + 5 \times 8^1 + 7 \times 8^0 \\ &= 2 \times 512 + 64 + 40 + 7 \\ &= 1135 \end{aligned}$$

## Sistem Bilangan Heksadesimal

Sistem bilangan heksadesimal memiliki basis 16 dan terdiri dari simbol 0 sampai 9 serta huruf A sampai F, di mana A–F mewakili nilai 10–15 dalam desimal. Sistem ini banyak digunakan dalam pengalamatan memori komputer dan pemrograman karena lebih ringkas dari biner.

Contoh:

$$\begin{aligned} 2BC_{16} &= 2 \times 16^2 + 11 \times 16^1 + 12 \times 16^0 + 1 \times 16^0 \\ &= 2 \times 4096 + 11 \times 256 + 12 \times 16 + 1 \times 1 \\ &= 8192 + 2816 + 192 + 1 = 11201 \end{aligned}$$

Tabel Konversi Bilangan Desimal, Biner, Oktal, dan Heksadesimal

Bilangan Desimal	Bilangan Biner	Bilangan Oktal	Bilangan Heksadesimal
0	0000	00	0
1	0001	01	1
2	0010	02	2
3	0011	03	3
4	0100	04	4
5	0101	05	5
6	0110	06	6
7	0111	07	7
8	1000	10	8
9	1001	11	9
10	1010	12	A
11	1011	13	B
12	1100	14	C
13	1101	15	D
14	1110	16	E
15	1111	17	F

### Contoh Soal

Mengapa sistem bilangan biner digunakan sebagai dasar dalam sistem digital, dan apa fungsi sistem bilangan heksadesimal dalam representasi data komputer?

### Pembahasan:

Sistem bilangan biner digunakan karena hanya memiliki dua simbol, yaitu 0 dan 1, yang sesuai dengan kondisi logika pada perangkat digital: mati (OFF) dan hidup (ON). Hal ini membuatnya ideal untuk mengontrol sirkuit elektronik dan menyusun data digital.

Sementara itu, sistem bilangan heksadesimal digunakan untuk menyederhanakan tampilan bilangan biner. Karena satu digit heksadesimal setara dengan empat digit biner, data panjang dalam biner dapat ditulis lebih ringkas, sehingga lebih mudah dibaca dan digunakan dalam pemrograman serta penulisan alamat memori komputer.



### Fakta Fisika di Sekitarmu

#### Kecil Tapi Penting: Rahasia 1 Byte

**Tahukah Kamu? 1 Byte = 8 Bit**, dan dalam bentuk biner, ini bisa menghasilkan **256 kombinasi angka** yang berbeda!

Itulah sebabnya file kecil seperti **gambar profil, dokumen, atau lagu pendek** bisa diubah menjadi deretan angka **0 dan 1**, lalu disimpan hanya dalam beberapa **kilobyte** saja. Komputer hanya perlu tahu posisi ON (1) dan OFF (0) untuk menyimpan semua informasi itu.



Byte – Canva.com

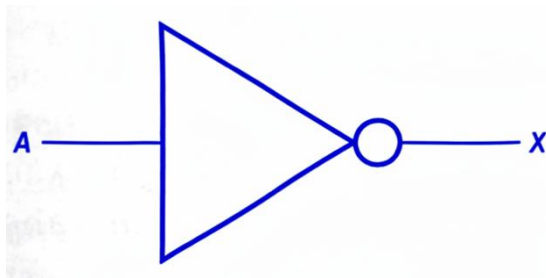


## 4. Gerbang Logika (Logika Digital dalam Elektronika)

Gerbang logika merupakan **komponen dasar dalam sistem elektronik digital** yang digunakan untuk memproses informasi berbasis data biner. Data biner terdiri dari dua nilai, yaitu **1 (benar/true)** dan **0 (salah/false)**. Setiap operasi dalam sistem digital dilakukan menggunakan gerbang logika yang mengacu pada **prinsip aljabar Boolean**.

Aljabar Boolean sendiri dikembangkan oleh **George Boole (1815–1864)**, seorang matematikawan asal Inggris. Dalam aljabar ini, setiap pernyataan logika hanya memiliki dua kemungkinan kondisi — benar atau salah. Gerbang logika menggunakan **input dan menghasilkan output** berdasarkan **aturan tertentu** yang dirangkum dalam bentuk **tabel kebenaran (truth table)**.

### Gerbang NOT (Pembalik)



Simbol Gerbang NOT – Gambar Ilustrasi Penerbit

Gerbang NOT adalah gerbang logika **dengan satu input dan satu output**. Fungsi utamanya adalah **membalik nilai input**. Jika input bernilai 0 maka output-nya menjadi 1, dan sebaliknya.

Tabel Kebenaran Gerbang NOT

A (Input)	X (Output)
0	1
1	0

### Gerbang AND

Gerbang AND memiliki **dua atau lebih input dan satu output**. Output hanya akan bernilai 1 jika **semua input-nya bernilai 1**. Jika ada satu saja input yang bernilai 0, maka output-nya 0.

Gambar Simbol:



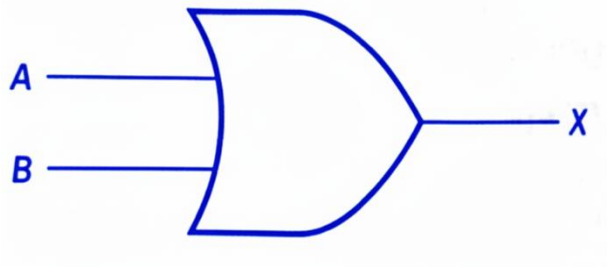
Simbol Gerbang AND – Gambar Ilustrasi Penerbit

Tabel Kebenaran Gerbang AND

A	B	X (Output)
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

## Gerbang OR

Gerbang OR akan menghasilkan output 1 jika **salah satu atau semua input bernilai 1**. Output hanya 0 jika semua input bernilai 0.



Simbol Gerbang OR – Gambar Ilustrasi Penerbit

Tabel Kebenaran Gerbang OR

A	B	X (Output)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

## Gerbang NAND (NOT AND)

Gerbang NAND adalah gabungan dari gerbang AND yang kemudian **dibalik** menggunakan gerbang NOT. Jadi, output bernilai **0 hanya jika semua input bernilai 1**, sisanya 1.

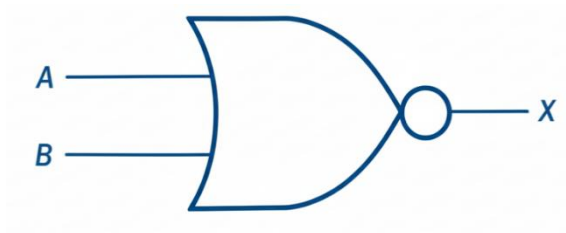
Tabel Kebenaran Gerbang NAND

A	B	X (Output)
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



Simbol Gerbang NAND – Gambar Ilustrasi Penerbit

### Gerbang NOR (NOT OR)



Simbol Gerbang NOR – Gambar Ilustrasi Penerbit

Gerbang NOR adalah gabungan dari gerbang OR yang dibalik oleh gerbang NOT. Output hanya bernilai **1** jika **semua input bernilai 0**.

Tabel Kebenaran Gerbang NOR

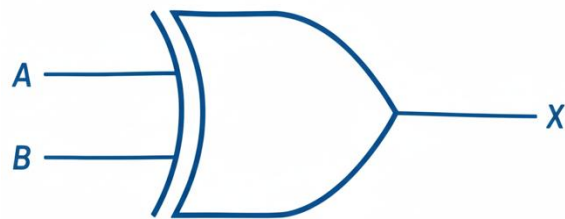
A	B	X (Output)
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

### Gerbang XOR (Eksklusif-OR)

Gerbang XOR hanya akan menghasilkan output 1 jika **kedua input-nya berbeda**. Jika sama, hasilnya 0.

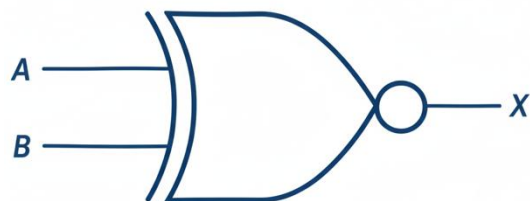
Tabel Kebenaran Gerbang XOR

A	B	X (Output)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



Simbol Gerbang XOR – Gambar Ilustrasi Penerbit

### Gerbang XNOR (Eksklusif-NOR)



Simbol Gerbang XNOR – Gambar Ilustrasi Penerbit

Kebalikan dari XOR. Gerbang XNOR akan menghasilkan output 1 jika kedua input bernilai **sama**, baik 0-0 atau 1-1.

Tabel Kebenaran Gerbang XNOR

A	B	X (Output)
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

### Contoh Soal

Jelaskan bagaimana cara kerja gerbang logika XOR dan XNOR, serta berikan contoh kondisi input yang menghasilkan output 1 pada masing-masing gerbang!

#### Pembahasan:

Gerbang logika XOR (Exclusive OR) bekerja dengan menghasilkan output 1 jika kedua input yang dimasukkan memiliki nilai yang berbeda. Jika input A dan B sama-sama 0 atau sama-sama 1, maka output-nya adalah 0. Sebaliknya, jika salah satu input bernilai 0 dan yang lain bernilai 1, maka output-nya menjadi 1. Contoh kondisi yang memenuhi ini adalah ketika  $A = 0$  dan  $B = 1$ , atau  $A = 1$  dan  $B = 0$ .

Sementara itu, gerbang logika XNOR adalah kebalikan dari XOR. Gerbang ini akan menghasilkan output 1 jika kedua input memiliki nilai yang sama. Artinya, baik  $A = 0$  dan  $B = 0$ , maupun  $A = 1$  dan  $B = 1$ , keduanya akan menghasilkan output 1. Jika nilai input berbeda, maka output-nya adalah 0. Kedua gerbang ini banyak digunakan dalam sistem digital yang memerlukan perbandingan antara dua data biner.





## 5. Media Penyimpanan Data Digital

Dalam era modern yang serba cepat dan dinamis, kebutuhan manusia terhadap penyimpanan data semakin meningkat. Dokumen digital kini menjadi bagian penting dalam berbagai aktivitas, baik dalam dunia pendidikan, bisnis, maupun industri. Seiring perkembangan teknologi, sistem penyimpanan data pun mengalami transformasi signifikan, dari penyimpanan fisik hingga berbasis digital. Berikut penjelasan beberapa jenis media penyimpanan data yang umum digunakan.

### Flash Disk

**Flash disk** atau dikenal juga sebagai **USB flash drive**, merupakan perangkat penyimpanan data portabel yang mudah dibawa dan digunakan kapan saja. Media ini memanfaatkan teknologi **flash memory**, yaitu sistem penyimpanan data yang mampu menyimpan dan mengakses informasi tanpa memerlukan daya listrik secara terus-menerus.

Flash disk menggunakan **jalur data USB (Universal Serial Bus)** untuk menghubungkan perangkat ke komputer atau laptop. Ukurannya yang kecil, ringan, serta kemampuannya untuk menyimpan data dalam kapasitas besar menjadikannya sebagai salah satu alat penyimpanan paling praktis.

#### Kelebihan flash disk:

- ▷ Ukuran kecil dan mudah dibawa.
- ▷ Proses transfer data cepat.
- ▷ Tahan terhadap guncangan karena tidak memiliki komponen mekanik.

#### Kekurangan flash disk:

- ▷ Mudah hilang karena ukurannya kecil.
- ▷ Daya tahan terhadap siklus baca-tulis terbatas.



### Fakta Fisika di Sekitarmu

#### Flash Disk Tidak Benar-Benar “Kosong” Saat Diformat

Pernahkan kamu mengira bahwa memformat flash disk membuat semua data hilang total? Faktanya, saat flash disk diformat, **data tidak langsung terhapus secara fisik**. Sistem hanya menandai ruang tersebut sebagai “siap ditulis ulang”. Dengan alat pemulihan data (data recovery), sebagian file lama masih bisa dikembalikan!

Coba format flash disk-mu lalu gunakan aplikasi *recovery* gratis untuk melihat data apa yang masih bisa dipulihkan.



Flash Disk – Canva.com

## Hard Disk Drive (HDD)

**Hard Disk Drive (HDD)** merupakan media penyimpanan yang menyimpan data pada **piringan magnetik** yang berputar dengan kecepatan tinggi. Data dibaca dan ditulis oleh kepala baca (read/write head) yang bergerak di atas permukaan piringan tersebut.

Umumnya, HDD digunakan sebagai penyimpanan internal pada komputer atau laptop untuk menampung sistem operasi, program, dan berkas pengguna. Selain itu, HDD juga tersedia dalam bentuk eksternal yang dapat digunakan untuk menyimpan data cadangan dengan bantuan **HDD enclosure**.



Hard Disk Drive (HDD) – Canva.com

### Kelebihan HDD:

- ▷ Kapasitas penyimpanan besar dengan harga terjangkau.
- ▷ Umur pemakaian relatif panjang.

### Kekurangan HDD:

- ▷ Rentan terhadap guncangan fisik karena memiliki komponen mekanik.
- ▷ Kecepatan baca-tulis lebih lambat dibandingkan SSD.

## Solid-State Drive (SSD)

**Solid-State Drive (SSD)** adalah jenis penyimpanan data modern yang bekerja dengan sistem **chip memori** mirip seperti SD card, namun memiliki kecepatan jauh lebih tinggi dibandingkan HDD. Tidak seperti HDD yang menggunakan piringan magnetik, SSD tidak memiliki bagian mekanik yang bergerak, sehingga proses baca-tulis data berlangsung lebih cepat dan efisien.

SSD juga dilengkapi **kontroler** untuk mengatur posisi data dan **memori penyangga (buffer memory)** berupa **Low Power Dynamic Data RAM (LPDDR)** yang mempercepat akses data.

### a. SSD SATA dan Mini SATA (mSATA)

SSD dengan konektor **SATA** memiliki bentuk dan ukuran mirip HDD SATA, namun jauh lebih cepat. Kecepatan tulis mencapai 530 MB/s dan kecepatan baca mencapai 550 MB/s

Sementara itu, **SSD mSATA** memiliki fungsi serupa tetapi berukuran lebih kecil dan digunakan pada perangkat yang lebih ringkas seperti laptop tipis.

### b. SSD Next Generation Form Factor (NGFF) M.2



SSD – Canva.com

**SSD M.2 (NGFF)** merupakan pengembangan dari SSD mSATA dengan konektor **M.2 mechanical key M+B**.

Keunggulan utama SSD M.2 adalah mendukung konfigurasi **RAID 0**, yaitu sistem yang menggabungkan dua SSD menjadi satu unit untuk meningkatkan kecepatan transfer data hingga dua kali lipat dibandingkan SSD mSATA.

Kelebihan SSD M.2 yakni kecepatan transfer tinggi, ukuran lebih kecil dan efisien dan dapat diintegrasikan langsung ke motherboard.

### c. SSD Non-Volatile Memory Express (NVMe) M.2

Jenis SSD ini merupakan teknologi terbaru yang terhubung langsung ke **processor** melalui jalur **PCIe x4**, memungkinkan kecepatan transfer data hingga **7.200 MB/s**. Kecepatan tulis mencapai 3,5 GB/s dan kecepatan baca mencapai 4 GB/s

SSD **NVMe M.2** menggunakan konektor **mechanical key M** dan dianggap sebagai jenis SSD tercepat saat ini. Kelebihan SSD NVMe diantaranya performa tinggi untuk aplikasi berat, konsumsi daya rendah dan tidak menimbulkan suara karena tanpa komponen mekanik.

**Tabel Perbandingan Jenis Media Penyimpanan**

Jenis Media	Teknologi Penyimpanan	Kecepatan Baca/Tulis	Daya Tahan	Mobilitas	Harga per GB
Flash Disk	Flash Memory	Sedang	Sedang	Sangat tinggi	Sedang
HDD	Piringan Magnetik	Rendah–Sedang	Sedang	Rendah	Murah
SSD SATA/mSATA	Chip NAND Flash	Cepat (530–550 MB/s)	Tinggi	Sedang	Menengah
SSD M.2	NAND Flash + Controller	Sangat cepat	Tinggi	Tinggi	Agak mahal
SSD NVMe M.2	PCIe Interface	Ekstrem (hingga 7.200 MB/s)	Sangat tinggi	Tinggi	Mahal

### Penyimpanan Data Volatile dan Non-Volatile

Penyimpanan data dibedakan menjadi dua jenis utama:

**Volatile:** Data hanya tersimpan saat ada aliran listrik. Contoh: **RAM (Random Access Memory)**.

**Non-Volatile:** Data tetap tersimpan meskipun tanpa daya listrik. Contoh: **Flash Disk, HDD, dan SSD**.

### Penyimpanan Awan (Cloud Storage)

Perkembangan teknologi informasi telah melahirkan **penyimpanan digital berbasis internet** yang dikenal sebagai **cloud storage**. Cloud storage memungkinkan pengguna menyimpan, mengakses, dan berbagi data secara **online** kapan pun dan di mana pun.

Contoh layanan cloud storage:

- Google Drive
- OneDrive
- Dropbox

#### Kelebihan:

- ▷ Kapasitas penyimpanan dapat diperluas.
- ▷ Akses data dari berbagai perangkat.
- ▷ Tidak memerlukan perangkat tambahan.

**Kekurangan:**

- ▷ Membutuhkan koneksi internet yang stabil dan cepat.
- ▷ Risiko keamanan data jika tidak terlindung dengan baik.

**Contoh Soal**

Bandingkan HDD (Hard Disk Drive) dan SSD (Solid-State Drive) dari segi prinsip kerja, kecepatan, dan ketahanan!

**Pembahasan:**

HDD bekerja menggunakan piringan magnetik berputar dan kepala baca-tulis mekanik. Karena ada komponen bergerak, HDD lebih rentan terhadap guncangan dan memiliki kecepatan baca-tulis lebih lambat.

Sebaliknya, SSD menggunakan chip memori NAND flash tanpa bagian mekanik, sehingga lebih cepat, tahan guncangan, dan lebih hemat daya. Namun, harga SSD per gigabyte lebih tinggi dibandingkan HDD.



## 6. Dampak Teknologi Digital terhadap Kehidupan Manusia

Perkembangan teknologi digital yang pesat membawa dampak besar bagi kehidupan manusia di berbagai bidang. Berbagai manfaat dapat dirasakan secara langsung, mulai dari kemudahan berkomunikasi, hiburan, hingga proses belajar dan aktivitas ekonomi. Namun, kemajuan ini juga memiliki sisi negatif yang perlu diwaspadai.

Berikut pembahasan lengkap mengenai dampak teknologi digital dalam kehidupan sehari-hari.

### Kemudahan dalam Komunikasi

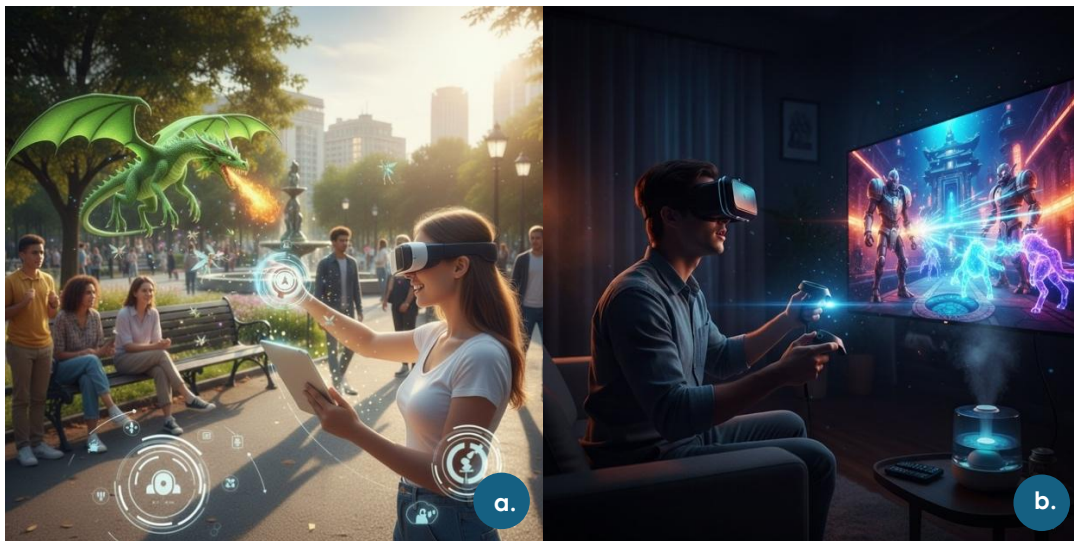
Teknologi digital telah merevolusi cara manusia berinteraksi. Kini, komunikasi tidak lagi terbatas pada percakapan telepon. Melalui perkembangan jaringan internet dan aplikasi pesan instan, kita dapat berkomunikasi jarak jauh dengan mudah lewat pesan teks, panggilan suara, video call, hingga surat elektronik (surel). Selain itu, media sosial membuat pertukaran informasi antarindividu menjadi lebih cepat dan praktis, cukup dengan menggunakan akun pengguna tanpa perlu mengetahui nomor telepon.

### Bidang Hiburan

Kemajuan teknologi digital telah mengubah cara manusia menikmati hiburan. Jika dahulu musik hanya bisa didengarkan melalui CD, DVD, atau radio, kini berbagai layanan **streaming musik dan film** memungkinkan pengguna menikmati konten sesuai selera secara daring. Industri perfilman juga mengalami perubahan besar: penonton tidak perlu lagi datang ke bioskop, cukup berlangganan aplikasi dan membayar biaya tertentu untuk menikmati ribuan tayangan.

Teknologi digital juga melahirkan bentuk hiburan yang lebih imersif, seperti:

- Augmented Reality (AR)** yang menampilkan objek virtual ke dunia nyata melalui layar perangkat.
- Virtual Reality (VR)** yang membawa pengguna masuk ke dunia digital secara penuh menggunakan perangkat khusus.



(a) Penggunaan augmented reality (AR) pada permainan interaktif dan Penggunaan virtual reality (VR) pada game 3D – Gambar Ilustrasi Penerbit



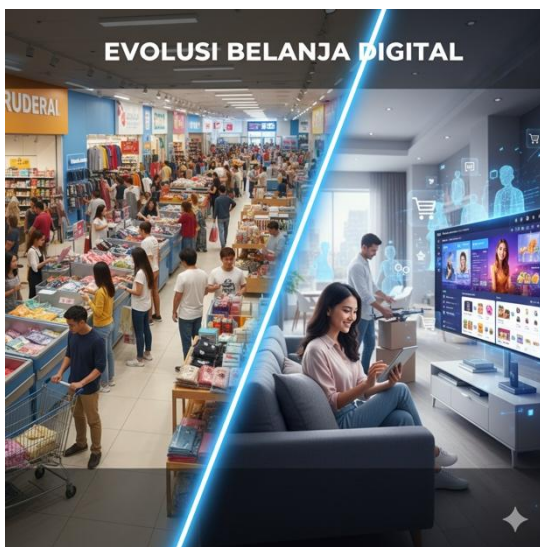
## Inovasi dalam Proses Pembelajaran

Teknologi digital juga berdampak positif pada bidang pendidikan. Konsep **e-learning** dan **platform pembelajaran online** membuat proses belajar menjadi lebih fleksibel dan luas. Siswa kini dapat mengakses sumber belajar dari mana saja dan kapan saja. Selain itu, pembelajaran menjadi lebih menarik karena adanya pendekatan **interaktif**, misalnya dengan video pembelajaran, kuis daring, serta simulasi berbasis komputer.

## Kemudahan Mengakses Informasi

Internet memungkinkan manusia memperoleh informasi dalam hitungan detik. Melalui mesin pencari seperti Google, pengguna dapat menemukan data, artikel, dan berita hanya dengan mengetik kata kunci tertentu.

Akses informasi yang cepat ini membantu masyarakat memperoleh pengetahuan baru secara efisien dan terbuka bagi siapa pun yang memiliki koneksi internet.



## Transformasi Cara Berbelanja

Perkembangan teknologi digital juga mengubah cara manusia berbelanja. Melalui platform e-commerce, masyarakat dapat membeli berbagai produk secara online tanpa harus datang ke toko. Platform ini dilengkapi fitur pencarian produk, sistem pembayaran digital (e-wallet), serta pelacakan pengiriman real-time. Hal ini menjadikan kegiatan belanja lebih praktis, cepat, dan aman.

*Evolusi Belanja Digital – Gambar Ilustrasi Penerbit*

**Tabel Dampak Positif dan Negatif Teknologi Digital**

Aspek Kehidupan	Dampak Positif	Dampak Negatif
<b>Komunikasi</b>	Mempermudah komunikasi jarak jauh secara cepat dan murah	Penggunaan berlebihan dapat menyebabkan isolasi sosial
<b>Hiburan</b>	Hadirnya hiburan interaktif melalui AR dan VR	Risiko kecanduan game dan media digital
<b>Pendidikan</b>	Proses belajar lebih fleksibel dan interaktif	Ketergantungan pada koneksi internet
<b>Ekonomi</b>	Munculnya e-commerce dan efisiensi transaksi	Ancaman keamanan data dan penipuan online
<b>Sosial</b>	Akses informasi terbuka dan global	Risiko penyalahgunaan data pribadi

## Dampak Negatif Teknologi Digital

Selain manfaatnya, kemajuan teknologi digital juga menimbulkan berbagai tantangan baru, antara lain:

**a. Pelanggaran Hak Kekayaan Intelektual (HKI)**

Data digital mudah diakses dan disalin tanpa izin, sehingga risiko plagiarisme semakin tinggi.

**b. Penyebaran Data Pribadi**

Informasi pribadi pengguna sering kali tersebar tanpa sepengetahuan atau izin, sehingga berpotensi disalahgunakan.

**c. Kecanduan Digital**

Penggunaan media sosial dan game online secara berlebihan dapat menimbulkan kecanduan yang berdampak pada kesehatan mental dan fisik.

**d. Keamanan Siber (Cyber Security)**

Serangan siber seperti virus, malware, dan peretasan menjadi ancaman serius bagi keamanan data pribadi maupun institusional.

**e. Isolasi Sosial**

Ketergantungan terhadap perangkat digital dapat membuat seseorang lebih suka berinteraksi dengan layar daripada dengan manusia di dunia nyata.

**f. Akses Konten Tidak Sesuai**

Anak-anak dan remaja rentan terpapar konten negatif jika tidak diawasi saat menggunakan internet.

**g. Penggantian Tenaga Kerja oleh Otomatisasi**

Teknologi robotika dan kecerdasan buatan (AI) mulai menggantikan pekerjaan manusia di berbagai sektor industri.

**h. Konsumsi Energi yang Tinggi**

Penggunaan teknologi digital dalam skala besar membutuhkan energi listrik yang besar, yang dapat menambah emisi karbon dan memperburuk perubahan iklim.

Teknologi digital memberikan dampak yang luas dalam berbagai aspek kehidupan manusia. Meskipun membawa kemudahan dan efisiensi, penggunaannya perlu diimbangi dengan kesadaran akan etika, keamanan, serta dampak lingkungan. Dengan pemanfaatan yang bijak, teknologi digital dapat menjadi alat yang mendukung kemajuan peradaban manusia tanpa menimbulkan kerugian sosial dan ekologis.

### Contoh Soal

Bagaimana peran teknologi **augmented reality (AR)** dan **virtual reality (VR)** dalam dunia pendidikan dan hiburan?

**Pembahasan:**

Dalam pendidikan, AR dan VR menciptakan pembelajaran interaktif yang memungkinkan siswa memahami konsep secara visual dan realistis, misalnya dengan simulasi laboratorium atau eksplorasi ruang 3D. Dalam hiburan, teknologi ini memberikan pengalaman imersif seperti bermain game seolah berada di dalam dunia digital. Keduanya membantu meningkatkan daya tarik dan efektivitas kegiatan belajar serta rekreasi.



## Kegiatan Kelompok

**Judul Kegiatan:** Menelusuri Ragam Teknologi Penyimpanan Data dan Prinsip Kerjanya

**Tujuan Pembelajaran:** Siswa mampu menganalisis jenis-jenis media penyimpanan data digital, memahami prinsip kerja masing-masing, serta mengomunikasikan hasil eksplorasi dalam bentuk kreatif dan kolaboratif.

### Langkah Kerja

1. **Identifikasi Awal:** Bersama kelompok kecil (3–5 orang), lakukan diskusi singkat untuk mengidentifikasi media penyimpanan data digital yang sering digunakan di kehidupan sehari-hari (contoh: flash disk, HDD, SSD, cloud storage, dll).
2. **Pembagian Tugas:** Pilih satu jenis media penyimpanan untuk dianalisis lebih dalam oleh kelompok Anda. Setiap kelompok harus membahas media penyimpanan yang berbeda.
3. **Analisis dan Diskusi Kelompok:** Cari tahu:
  - ▷ Prinsip kerja media penyimpanan tersebut
  - ▷ Teknologi yang digunakan (contoh: chip, piringan magnet, jalur SATA/NVMe, dll)
  - ▷ Kelebihan dan kekurangannya dibanding media lain
  - ▷ Contoh penggunaannya dalam kehidupan nyata
4. **Kreasi Media Presentasi:** Tuangkan hasil diskusi dalam bentuk kreatif seperti:
  - ▷ Poster infografis
  - ▷ Mind map digital
  - ▷ Presentasi interaktif (bisa pakai Canva, Google Slides, PowerPoint)
  - ▷ Simulasi sederhana atau model visual (jika memungkinkan)
5. **Sumber Informasi:** Gunakan buku teks ini, buku referensi lainnya, artikel terpercaya, dan internet untuk memperkaya pemahaman. Cantumkan sumber rujukan dalam karya Anda.
6. **Presentasi Kelompok:** Presentasikan hasil eksplorasi di depan kelas. Setiap kelompok diberikan waktu maksimal 5 menit untuk memaparkan hasil diskusi secara jelas dan komunikatif.
7. **Refleksi Kritis:** Setelah seluruh kelompok presentasi, lakukan refleksi bersama:
  - ▷ Apa media penyimpanan yang paling efisien untuk masa depan?
  - ▷ Bagaimana perkembangan teknologi penyimpanan memengaruhi cara kita hidup dan bekerja?

## Rangkuman

### 1) Evolusi Komputer dalam Era Digital

Perkembangan komputer telah melalui beberapa generasi, dari ukuran besar dan fungsi terbatas hingga menjadi perangkat portabel yang cerdas dan terhubung internet. Komputer masa kini tidak hanya memproses data, tetapi juga mampu belajar dan beradaptasi dengan bantuan kecerdasan buatan.

### 2) Sistem Transmisi Data dan Informasi

Transmisi data adalah proses pengiriman informasi antar perangkat melalui media tertentu, seperti kabel atau gelombang elektromagnetik. Kecepatannya dipengaruhi oleh lebar pita frekuensi dan protokol komunikasi yang digunakan, baik secara seri maupun paralel.

### 3) Sistem Representasi Bilangan dalam Transmisi Data

Data digital direpresentasikan dalam bentuk biner (0 dan 1), yang dikenal sebagai bit. Delapan bit membentuk satu byte, yang memungkinkan komputer menyimpan hingga 256 kombinasi data. Sistem ini mendasari semua aktivitas penyimpanan dan pengolahan data dalam komputer.

### 4) Gerbang Logika (Logika Digital dalam Elektronika)

Gerbang logika adalah sirkuit dasar dalam elektronika digital yang memproses sinyal biner menggunakan prinsip aljabar Boolean. Jenis-jenis gerbang seperti NOT, AND, OR, NAND, NOR, XOR, dan XNOR digunakan untuk mengendalikan output berdasarkan kombinasi input tertentu.

### 5) Media Penyimpanan Data Digital

Terdapat berbagai jenis media penyimpanan, seperti flash disk, HDD, dan SSD. SSD terbagi lagi menjadi SATA, mSATA, M.2 NGFF, dan NVMe dengan kecepatan transfer berbeda. Saat ini juga tersedia cloud storage sebagai solusi penyimpanan digital berbasis internet yang fleksibel.

### 6) Dampak Teknologi Digital terhadap Kehidupan Manusia

Teknologi digital telah mengubah cara manusia bekerja, belajar, dan berinteraksi. Dampaknya mencakup kemudahan komunikasi, otomatisasi pekerjaan, hingga munculnya peluang dan tantangan baru seperti keamanan data dan etika dalam penggunaan kecerdasan buatan.

## Latihan Soal

1. Teknologi digital telah menggantikan banyak sistem analog karena efisiensinya. Namun, berikut ini **bukan keunggulan utama teknologi digital dibanding sistem analog** adalah...
  - A. Data dapat dikompresi tanpa mengurangi kualitas
  - B. Proses manipulasi data lebih cepat dan akurat
  - C. Data digital tidak rentan terhadap gangguan
  - D. Dibutuhkan media transmisi khusus yang mahal
  - E. Penyimpanan data digital dapat dilakukan dalam ukuran lebih kecil
2. Dalam proses komunikasi modern, sinyal digital dikirimkan menggunakan gelombang elektromagnetik. Gelombang yang **paling umum digunakan dalam transmisi data nirkabel jarak jauh** adalah...
  - A. Gelombang sinar-X
  - B. Gelombang inframerah
  - C. Gelombang radio
  - D. Gelombang gamma
  - E. Gelombang ultrasonic
3. Perhatikan pernyataan berikut:

"Komputer generasi awal memiliki ukuran besar dan konsumsi daya tinggi, serta menggunakan tabung vakum."

Dari pernyataan tersebut, **yang tidak termasuk karakteristik komputer generasi pertama** adalah...

  - A. Menggunakan tabung vakum
  - B. Membutuhkan ruang besar
  - C. Beroperasi dengan chip silicon
  - D. Memiliki konsumsi daya tinggi
  - E. Sering mengalami panas berlebih
4. Dalam sistem transmisi data digital, pemrosesan informasi dilakukan dalam bentuk bilangan biner. Bilangan biner **1011** jika dikonversi ke desimal adalah...
  - A. 10
  - B. 11
  - C. 12
  - D. 13
  - E. 14
5. Penyimpanan digital berkembang pesat. Salah satu perangkat penyimpanan yang paling umum digunakan di ponsel pintar adalah...
  - A. Flash Disk
  - B. RAM
  - C. Hard Drive
  - D. Memory Card
  - E. CD-ROM

6. Pernyataan berikut ini yang **tidak tepat mengenai keunggulan penyimpanan cloud** adalah...
- A. Dapat diakses kapan saja asal terhubung internet
  - B. Aman meski perangkat fisik rusak
  - C. Kapasitas dapat disesuaikan tanpa beli perangkat baru
  - D. Tidak membutuhkan koneksi internet sama sekali
  - E. Dapat digunakan lintas perangkat dan platform
7. Dalam sistem bilangan heksadesimal, bilangan biner **1110** setara dengan...
- A. A
  - B. D
  - C. E
  - D. F
  - E. C

Akses latihan soal  
lainnya di sini yuk!



Latihan Soal Fisika  
Kelas 12 BAB 9

## Referensi

Wikipedia. (2023). *Sejarah komputer*. Diakses pada 15 September 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Sejarah\\_komputer](https://id.wikipedia.org/wiki/Sejarah_komputer)

Wikipedia. (2023). *Gerbang logika*. Diakses pada 12 September 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Gerbang\\_logika](https://id.wikipedia.org/wiki/Gerbang_logika)

Wikipedia. (2023). *Penyimpanan data digital*. Diakses pada 10 September 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Penyimpanan\\_digital](https://id.wikipedia.org/wiki/Penyimpanan_digital)

Wikipedia. (2023). *Transmisi data*. Diakses pada 9 September 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Transmisi\\_data](https://id.wikipedia.org/wiki/Transmisi_data)

Wikipedia. (2023). *Bilangan biner*. Diakses pada 8 September 2025, dari [https://id.wikipedia.org/wiki/Bilangan\\_biner](https://id.wikipedia.org/wiki/Bilangan_biner)

Sadikin, A., & Hidayat, T. (2022). *Fisika SMA/MA Kelas XII Kurikulum Merdeka*. Jakarta: Pusat Perbukuan Kemdikbudristek.

Nugroho, A. (2020). *Pengantar Teknologi Informasi dan Komunikasi*. Yogyakarta: ANDI.

Sutrisno, E. (2021). *Dasar-Dasar Elektronika Digital*. Bandung: Penerbit Informatika.