

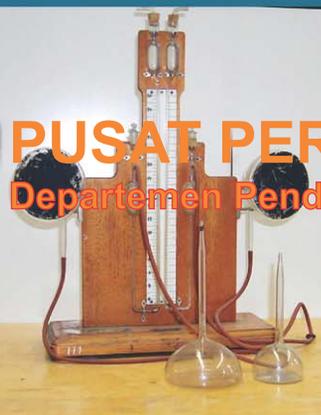


Drajat

Fisika

untuk SMA/MA Kelas XII

Fisika untuk SMA/MA Kelas XII



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Drajat

Fisika

untuk SMA/MA kelas XII

Drajat



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta Pada Departemen Pendidikan Nasional
dilindungi oleh Undang-Undang

Fisika untuk SMA/MA Kelas XII

Penulis : Drajat
Penyunting : Tim Kreatif Smart
Pewajah Isi : Tim Kreatif Smart
Pewajah Ilustrasi : Tim Kreatif Smart
Pewajah Sampul : Tim Kreatif Smart

Katalog Dalam Terbitan (KDT)

530.07

DRA

DRAJAT

a

Fisika : untuk SMA/MA Kelas XII / penulis, Drajat ; editor, Tim Kreatif Smart ; ilustrator, Tim Kreatif Smart. — Jakarta : Pusat Perbukuan, Departemen Pendidikan Nasional, 2009.

vi, 382 hlm. : illus. ; 25 cm

Bibliografi : hlm. 369

Indeks

ISBN 978-979-068-802-5 (no jilid lengkap)

ISBN 978-979-068-811-7

1. Fisika-Studi dan Pengajaran I. Judul

II. Tim Kreatif Smart

Hak Cipta Buku ini dibeli oleh Departemen Pendidikan Nasional
dari Penerbit : PT Sutra Benta Perkasa

Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional Tahun 2009

Diperbanyak oleh : ...

Kata Sambutan

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Departemen Pendidikan Nasional, pada tahun 2009, telah membeli hak cipta buku teks pelajaran ini dari penulis/penerbit untuk disebarluaskan kepada masyarakat melalui situs internet (*website*) Jaringan Pendidikan Nasional.

Buku teks pelajaran ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan dan telah ditetapkan sebagai buku teks pelajaran yang memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 9 Tahun 2009 tanggal 12 Februari 2009.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para penulis/penerbit yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para siswa dan guru di seluruh Indonesia.

Buku-buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*down load*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun, untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Diharapkan bahwa buku teks pelajaran ini akan lebih mudah diakses sehingga siswa dan guru di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri dapat memanfaatkan sumber belajar ini.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para siswa kami ucapkan selamat belajar dan manfaatkanlah buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, Juni 2009
Kepala Pusat Perbukuan

Kata Pengantar

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas karunia-Nya kepada kita hingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan buku ini.

Pada dasarnya, pelajaran Fisika bertujuan untuk mengembangkan kemampuan berpikir siswa secara analisis induktif maupun analisis deduktif dengan menerapkan konsep-konsep fisika agar dapat mengambil keputusan, baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Dengan demikian, buku ini disusun sedemikian rupa dengan harapan dapat membantu tercapainya tujuan dari adanya pelajaran fisika.

Untuk mendukung tujuan tersebut, buku *Fisika untuk SMA/MA Kelas XII* ini disusun dengan muatan yang memiliki ciri-ciri khusus, yaitu sebagai berikut.

1. Informasi dan masalah kontekstual yang disertai gambar pada setiap awal bab dengan sedikit informasi untuk memancing daya keingintahuan siswa terhadap materi yang terdapat di dalam bab tersebut.
2. Pemaparan konsep fisika beserta contoh-contoh soal dengan menggunakan analisis induktif maupun deduktif supaya memudahkan siswa dalam memahami konsep fisika.
3. Eksperimen yang berupa praktik dengan tuntutan analisis supaya siswa dapat memahami konsep fisika tidak hanya secara teori, melainkan juga secara praktik.
4. Uji kemampuan yang berwujud soal supaya siswa dapat mengukur kemampuannya sendiri dalam memahami materi yang ada di dalam bab tersebut.
5. Uji kompetensi yang terdiri atas pemahaman konsep dan soal psikomotorik yang disajikan pada setiap akhir bab yang berguna untuk mengetahui kemampuan siswa secara teoretis maupun praktik dalam memahami materi dalam satu bab yang telah dipelajarinya.
6. Uji kompetensi semester yang disajikan pada akhir semester untuk mengetahui kemampuan siswa dalam menguasai materi fisika selama satu semester.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada penerbit beserta awak yang membidangi terbitnya buku ini hingga menjadi buku yang menarik. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh pengguna buku ini, dengan harapan buku ini dapat bermanfaat bagi kemajuan pendidikan nasional. Selain itu, penulis juga mengharapkan saran dan kritik yang membangun dari semua pihak sehingga ke depan buku ini menjadi lebih bermanfaat bagi para siswa dalam proses belajar mengajar.

Bandung, Mei 2007
Penulis

Daftar Isi

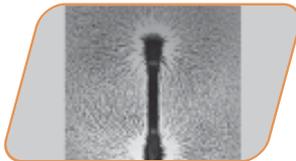
Kata Sambutan	iii
Kata Pengantar	iv

Bab 1



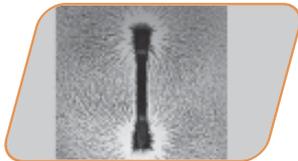
Gelombang	1
A. Gerak Gelombang	2
B. Interferensi Cahaya	47
C. Difraksi Cahaya	53
D. Daya Urai Optik	56
E. Polarisasi Cahaya	58
F. Gelombang Bunyi	64
G. Tinggi Nada, Kuat Bunyi, dan Warna Bunyi	71
H. Interferensi Gelombang Bunyi	74
I. Resonansi	77
J. Taraf Intensitas Bunyi	80
K. Pemanfaatan Gelombang Ultrasonik	83

Bab 2



Listrik Statis	91
A. Hukum Coulomb	92
B. Kuat Medan Listrik	99
C. Hukum Gauss	103
D. Energi Potensial	109
E. Kapasitor	115

Bab 3

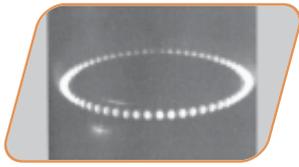


Kemagnetan	133
A. Pengertian Kemagnetan	134
B. Medan Magnetik	140
C. Gaya Magnet	151
D. Gaya Gerak Listrik (GGL) Induksi	161

Bab 4



Rangkaian Arus dan Tegangan Bolak-Balik	189
A. Arus dan Tegangan Bolak-Balik	190
B. Resistor, Induktor, dan Kapasitor dalam Rangkaian AC	198
C. Resistor dan Induktor Seri	203
D. Resistor dan Kapasitor Seri	205
E. Rangkaian R-L-C	207
F. Daya pada Rangkaian Arus Bolak-Balik	211
Uji Kompetensi Semester 1	219



Bab 5

Radiasi Benda Hitam	225
A. Pengertian Radiasi Benda Hitam	226
B. Pergeseran Wien	228
C. Teori Rayleigh-Jeans	229
D. Teori Kuantum Max Planck	230
E. Efek Fotolistrik	230
F. Efek Compton	233
G. Teori Gelombang De Broglie	237



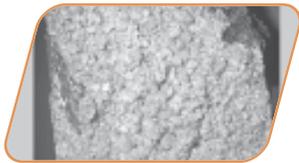
Bab 6

Fisika Atom	245
A. Perkembangan Teori Atom	246
B. Atom Berelektron Banyak	254



Bab 7

Teori Relativitas Khusus	275
A. Transformasi Galileo dan Percobaan Michelson-Morley	276
B. Prinsip-Prinsip Relativitas Einstein	286



Bab 8

Inti Atom dan Radioaktivitas	315
A. Struktur Inti	316
B. Radioaktivitas	327
Uji Kompetensi Semester 2	361
Kewirausahaan	367
Daftar Pustaka	369
Lampiran	370
Glosarium	372
Kunci Jawaban	380
Indeks	382



Sumber: CD Image, 2004

Gelombang

Percayakah Anda bahwa manusia tidak dapat hidup tanpa adanya getaran dan gelombang? Pengertian getaran telah Anda pelajari pada kelas XI semester 1 dan tidak ada salahnya mari kita tinjau kembali penjelasannya.

Mungkin Anda tidak percaya, karena yang mengakibatkan manusia tidak dapat hidup seandainya manusia tanpa makan dan minum atau tanpa oksigen, bukan karena getaran dan gelombang.

Alasan di atas memang benar, tetapi mari kita perhatikan bagaimana sumber makanan ada, air dapat dimasuk, mata dapat melihat, telinga dapat mendengar, atau bagaimana tumbuhan dapat melepaskan oksigennya ke udara. Semua kejadian ini memerlukan energi. Energi dapat berubah bentuk atau dapat mengalir ke tempat lain karena adanya getaran dan gelombang. Gelombang merupakan peristiwa merambatnya energi akibat getaran lokal partikel atau benda. Getaran lokal adalah partikel atau benda di sekitarnya, demikian seterusnya. Akibat getaran pertama tadi, energi dapat merambat. Energi digunakan untuk berbagai keperluan, contoh telinga dapat mendengar karena sumber bunyi menggetarkan molekul-molekul udara dan terus merambat sehingga molekul-molekul udara di sekitar telinga ikut bergetar dan menggetarkan gendang telinga. Lalu, syaraf dalam tubuh menyampaikan informasi tentang gelombang tersebut ke dalam otak dan otak kita memprosesnya.

Bab 1

Standar Kompetensi

Menerapkan konsep dan prinsip gejala gelombang dalam menyelesaikan masalah.

Kompetensi Dasar

- Mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang secara umum.
- Mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang, bunyi dan cahaya.
- Mendeskripsikan konsep dan prinsip gelombang bunyi dan cahaya dalam teknologi

- A. Gerak Gelombang
- B. Interferensi Cahaya
- C. Difraksi Cahaya
- D. Daya Urai Optik
- E. Polarisasi Cahaya
- F. Gelombang Bunyi
- G. Tinggi Nada, Kuat Bunyi, dan Warna Bunyi
- H. Interferensi Gelombang Bunyi
- I. Resonansi
- G. Taraf Intensitas Bunyi
- K. Pemanfaatan Gelombang Ultrasonik

Alasan inilah yang mengakibatkan manusia tidak dapat hidup tanpa adanya gelombang dan getaran. Pada dasarnya, tidak hanya manusia yang memerlukan gelombang dan getaran, namun seluruh makhluk hidup memerlukan getaran dan gelombang. Oleh karena itu, getaran dan gelombang sangat penting dalam kehidupan makhluk hidup

Kata Kunci

Gelombang
Gelombang transversal
Gelombang longitudinal
Difraksi
Interferensi
Bunyi

A. Gerak Gelombang

Coba Anda perhatikan batu yang dilempar di atas kolam. Amati apa yang terjadi dengan permukaan air? Anda akan melihat lingkaran-lingkaran kecil terbentuk di tempat jatuhnya batu tersebut. Selanjutnya, lingkaran-lingkaran yang kecil akan melebar menjadi lingkaran-lingkaran besar. Seandainya, ada sehelai daun yang berada di atas permukaan air maka akan terlihat daun akan mengalami gerakan naik turun. Mengapa daun tersebut bergerak?

Dalam bab ini, Anda akan mempelajari gejala gelombang secara umum dan untuk bab selanjutnya, Anda akan mempelajari gelombang elektromagnetik dan gelombang bunyi.

1. Gejala Gelombang

Coba apa yang Anda ketahui mengenai Gelombang? Gelombang merupakan perambatan dari getaran. Dalam perambatannya, gelombang membutuhkan suatu medium. Perambatan gelombang tidak disertai dengan perpindahan tempat permanen dari materi-materi medium perantaranya. Gelombang dalam perambatannya memindahkan energi.

Berdasarkan medium perambatannya, gelombang dibagi menjadi dua macam, yaitu gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik. Gelombang mekanik adalah gelombang yang dalam perambatannya memerlukan medium. Contoh gelombang mekanik adalah gelombang bunyi, gelombang tali, dan gelombang pegas, dan gelombang permukaan air. Adapun gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang dalam perambatannya tidak memerlukan medium.

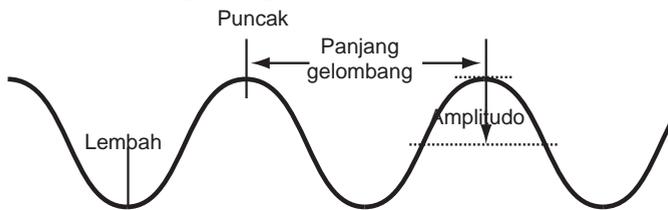
a. Gelombang pada Slinky

Berdasarkan arah getarnya, gelombang dapat dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu gelombang transversal dan gelombang longitudinal. Untuk dapat melihat gejala kedua gelombang berupa arah getarannya, Anda dapat menggunakan sebuah alat yang disebut slinki. Alat ini adalah sebuah pegas yang terbuat dari logam pipih.

1) Gelombang Transversal

Gelombang transversal adalah gelombang yang arah getarannya tegak lurus arah perambatan gelombang. Selain terjadi pada slinki, Gelombang pada tali dan gelombang cahaya merupakan contoh dari gelombang transversal. Pada gelombang transversal, satu panjang gelombang adalah satu bukit ditambah dengan satu lembah gelombang.

2) Gelombang Longitudinal



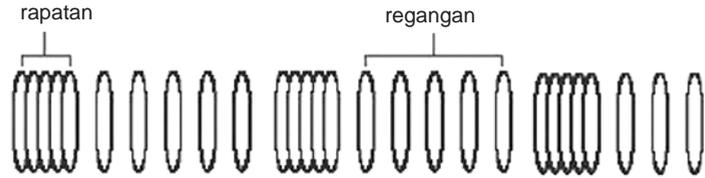
Gambar 1.1

Gelombang transversal

Gelombang longitudinal merupakan gelombang yang arah getarannya berimpit atau sejajar dengan arah perambatan gelombang. Contohnya gelombang bunyi atau gelombang tekanan udara. Gelombang tekanan udara berupa rapatan-rapatan dan regangan-regangan. Satu rapatan ditambah satu regangan disebut satu panjang gelombang.

Gejala gelombang pada slinki dapat berupa getaran transversal ataupun longitudinal bergantung cara Anda menggetarkan slinki tersebut. Apabila digetarkan ke atas dan ke bawah, akan terbentuk gelombang transversal pada slinki. Apabila diberi getaran ke depan dan ke belakang, akan timbul rapatan dan regangan yang merupakan gelombang longitudinal.

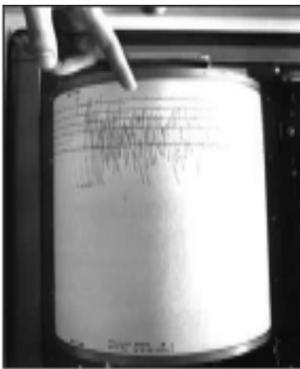
Gambar 1.2
Gelombang Longitudial



Jika gelombang merambat dari suatu medium ke medium lain, gelombang itu akan mengalami pembiasan. Sifat umum dari gelombang adalah dapat dipantulkan dan dibiaskan. Sifat gelombang lainnya adalah dapat mengalami interferensi dan difraksi (lenturan). Khusus mengenai gelombang transversal, gelombang ini dapat juga mengalami polarisasi.

b. Gelombang pada Permukaan Air

Coba Anda perhatikan gelombang pada permukaan air. Muka gelombang dari permukaan air akan berupa lingkaran-lingkaran. Mulai dari lingkaran kecil, lalu menjadi lingkaran besar. Muka gelombang didefinisikan sebagai kedudukan titik-titik yang memiliki fase sama pada gelombang tersebut. Jika pusat getarannya merupakan sebuah titik, muka gelombangnya akan berupa lingkaran-lingkaran. Jarak antara dua muka gelombang yang berdekatan sama dengan satu panjang gelombang (λ) dan waktu yang dibutuhkan untuk menempuh satu panjang gelombang disebut satu periode (T).



Sumber: CD Image, 2004

Gambar 1.3
Gelombang seismik

c. Gelombang Seismik

Anda mungkin pernah mendengar ataupun merasakan gempa bumi? Pada saat terjadi gempa, Anda merasakan bumi dan benda-benda di sekitar Anda berguncang. Apa yang menyebabkan gempa tersebut? Jika suatu gempa mengguncang lapisan kerak bumi, guncangan itu akan diteruskan oleh getaran yang disebut gelombang seismik. Gelombang ini merambat ke segala arah dan berasal dari sumber gempa di bawah permukaan.

Dengan menggunakan alat pencatat gempa yaitu seismograf, para ahli gempa telah mengelompokkan tiga jenis gelombang seismik. Gelombang pertama yang akan terdeteksi adalah gelombang primer (P). Gelombang ini

merupakan gelombang longitudinal yang bergerak melalui batuan dengan merapatkan dan meregangkan batuan-batuan yang dilaluinya. Gelombang berikutnya yang akan terdeteksi oleh sismograf adalah gelombang sekunder (*S*). Gelombang ini merambat menembus batuan dengan arah getar tegak lurus terhadap arah perambatannya sehingga dapat menaikkan atau menurunkan batuan-batuan yang dilaluinya.

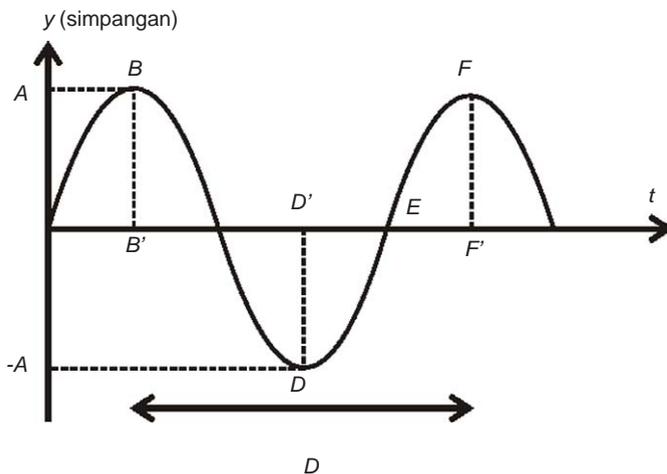
Jika gelombang *P* dan *S* telah mencapai permukaan bumi, kedua gelombang ini berubah menjadi gelombang seismik jenis ketiga yaitu gelombang permukaan. Gelombang permukaan ini dapat dibagi menjadi dua macam, yaitu gelombang love yang menggetarkan permukaan tanah dalam arah bolak-balik mendatar dan gelombang Reyleigh yang bergerak bolak-balik naik turun, seperti gelombang air laut.

2. Gelombang Satu Dimensi

a. Gelombang Berjalan

1) Persamaan Umum Gelombang

Perhatikan gambar berikut ini.

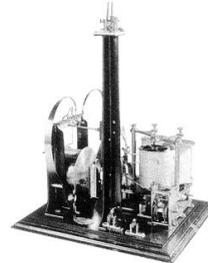


Waktu untuk menempuh satu panjang gelombang adalah periode (*T*). Kecepatan perambatan gelombang adalah satu panjang gelombang dibagi waktu untuk menempuh satu panjang gelombang itu. Secara matematis persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

Tahukah Anda?

Seismograf

Pada 1935, ahli seismologi



Amerika, Charles F. Richter (1900-1985) mengembangkan sistem pengukuran kekuatan gempa. Setiap angka pada skala Richter menggambarkan 10 kali peningkatan gerakan tanah yang tercatat oleh seismograf. Jadi, pada gempa bumi dengan kekuatan 7, tanah bergerak 100 kali lebih banyak daripada gempa berkekuatan 5 pada skala Richter.

Sumber: Buku Saku Penemuan, 1997

Gambar 1.4

A = Amplitudo gelombang
 $CG = QE = B'F'$ = panjang gelombang

B dan F = titik puncak D = lembah

$$v = \frac{\lambda}{T}, \text{ karena } f = \frac{1}{T} \rightarrow \text{ maka, } v = f\lambda$$

dengan:

v = laju perambatan gelombang (m/s)

λ = panjang gelombang (m)

T = periode getarannya (sekon)

f = frekuensi getarannya (Hz)

Contoh Soal 1.1

Tentukan kecepatan perambatan sebuah gelombang yang memiliki panjang gelombang 40 cm dan frekuensi 25 Hz.

Jawab:

Diketahui:

$$\lambda = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$$

$$f = 25 \text{ Hz}$$

Dengan menggunakan persamaan di atas. Maka,

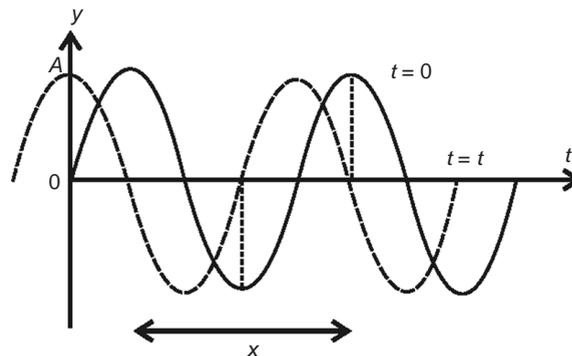
$$v = f\lambda$$

$$v = 25 \text{ Hz} \times 0,4 \text{ m} = 10 \text{ m/s}$$

1) Persamaan Gelombang Berjalan

Seutas tali yang cukup panjang digetarkan sehingga pada tali terbentuk gelombang transversal berjalan. Gelombang merambat dari titik O sebagai pusat koordinat menuju arah sumbu X positif.

Persamaan Simpangan di Titik O



Gambar1.5

Gelombang membuat searah sumbu $-x$ positif. Perambatan ditunjukkan dengan dua gelombang yang sama pada dua waktu yang berbeda, yaitu pada saat $t = 0$ dan $t = t$

Jika titik O telah bergetar harmonik selama t sekon, simpangan gelombang di titik O akan memenuhi simpangan getar harmonis yang memenuhi persamaan sebagai berikut.

$$y = A \sin \omega t$$

dengan:

y = simpangan gelombang = simpangan getaran titik yang dilalui (meter)

A = amplitudo = simpangan maksimum (meter)

ω = kecepatan sudut (rad/s): $\omega = 2\pi f$ dengan f frekuensi getar

t = lamanya bergetar (sekon)

Jika saat $t = 0$, $y = 0$, dan v_y positif (ke arah y positif)

Karena $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ maka persamaan $y = A \sin \omega t$ dapat ditulis menjadi

$$y = A \sin \omega t = A \sin 2\pi ft = A \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

$$y = A \sin 2\pi \phi$$

dengan ϕ adalah fase gelombang yang memiliki nilai:

$$\phi = t \times f = \frac{t}{T}$$

sedangkan sudut fase gelombang adalah $\theta = \omega t$. Jadi, sudut di belakang sinus disebut sebagai *sudut fase gelombang*.

Gelombang merambat dari titik O menuju sumbu- x positif. Sebuah titik P berjarak x dari titik O akan ikut bergetar karena adanya rambatan dari titik O ke titik P . Gelombang yang terbentuk ini disebut gelombang berjalan. Waktu yang diperlukan oleh gelombang untuk merambat

dari titik O ke titik P adalah $\frac{x_p}{v}$ sekon.

Jika titik O telah bergetar selama t sekon dan waktu yang diperlukan oleh gelombang untuk sampai di titik

P adalah $\frac{x}{v}$. Maka, titik P baru bergetar selama $\left(t - \frac{x}{v}\right)$ sekon sehingga persamaan simpangan gelombang di titik P adalah:

$$y_p = A \sin \omega \left(t - \frac{x_p}{v}\right)$$

Secara umum dapat dituliskan fungsi gelombang merambat

$$y(x, t) = A \sin \omega \left(t - \frac{x_p}{v} \right)$$

Sudut fase gelombang di titik P adalah:

Contoh Soal 1.2

Tentukanlah sudut fase gelombang di titik P jika titik O telah bergetar selama 2 sekon. Jarak titik P ke O adalah 4 meter, kecepatan perambatan gelombang adalah 8 m/s dan periode gelombang 2 sekon.

Jawaban:

Diketahui:

$$t = 2 \text{ sekon}$$

$$T = 2 \text{ sekon}$$

$$v = 8 \text{ m/s}$$

$$\lambda = 4 \text{ meter}$$

Sudut fase gelombang di titik P adalah:

$$\theta_p = \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x_p}{v} \right) = \frac{2\pi}{T} \left(2 - \frac{4}{8} \right) = \pi \text{ rad}$$

Persamaan $y_p = A \sin \omega \left(t - \frac{x_p}{v} \right)$ berlaku untuk gelombang yang merambat ke arah sumbu X positif. Untuk gelombang yang merambat dari sumbu X positif menuju pusat koordinat atau menuju sumbu x negatif akan berlaku persamaan:

$$y_p = A \sin \omega \left(t + \frac{x}{v} \right)$$

Jadi, secara umum persamaan gelombang berjalan dapat ditulis persamaannya sebagai berikut.

$$y_p = A \sin \omega \left(t \pm \frac{x}{v} \right) = A \sin 2\pi f \left(t \pm \frac{x}{v} \right) =$$

$$A \sin \left(2\pi f t \pm 2\pi f \frac{x}{v} \right)$$

$$y_p = A \sin (2\pi f t \pm kx)$$

Gelombang berjalan pada persamaan terjadi jika arah getar gelombang mulai ke atas. Jika pada saat $t = 0$, di O arahnya ke bawah, artinya $t = 0$ di $x = 0$, v_y negatif. Maka,

persamaan simpangan gelombang akan menjadi:

$$y_p = \pm A \sin(2\pi ft \pm kx) = \pm A \sin(\omega t \pm kx)$$

Persamaan simpangan gelombang harmonik di titik P dapat ditulis persamaannya menjadi:

$$y_p = \pm A \sin(2\pi ft \pm kx) = \pm A \sin(\omega t \pm kx)$$

atau

$$y_p = \pm A \cos(\omega t \pm kx)$$

dengan:

y_p = simpangan gelombang di titik P

A = amplitudo getaran

x = posisi titik P pada tali diukur dari titik asal

v = laju perambatan gelombang

ω = kecepatan sudut getaran = frekuensi sudut gelombang

f = frekuensi getaran = frekuensi gelombang

T = periode getaran = periode (waktu) gelombang

k = bilangan gelombang = tetapan penjarangan gelombang

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

t = lamanya titik asal telah bergetar

λ = panjang gelombang

θ = sudut yang di belakang sin atau cos = sudut fase gelombang

Contoh Soal 1.3

Sebuah gelombang berjalan dengan persamaan simpangan:

$$y = 0,04 \sin(12\pi t - 8x) \text{ m}$$

Jarak x dalam meter dan t dalam sekon. Kemudian, tentukanlah:

- arah rambatan gelombang;
- amplitudo gelombang;
- frekuensi gelombang;
- bilangan gelombang;
- panjang gelombang;
- kecepatan gelombang.

Persamaan umum gelombang berjalan

$$y = A \sin(2\pi ft - kx)$$

Telah diketahui persamaan simpangan adalah

$$y = 0,04 \sin(12\pi t - 8x)$$

sehingga akan diperoleh:

- a. Arah rambat gelombang ke kanan yaitu ke arah sumbu x positif. Karena tanda di depan x adalah negatif ($-$) dan di depan t berbeda:

$$y = 0,04 \sin(12\pi t - 8x) = -0,04 \sin(8x - 12\pi t)$$

- b. Amplitudo: $A = 0,04 \text{ m} = 4 \text{ m}$

$$2\pi f = 12\pi \rightarrow f = \frac{12\pi}{2\pi} = 6 \text{ Hz}$$

- c. Frekuensi:

- d. Panjang gelombang: $k = 8$ (bilangan di depan x)

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = 8$$

- e. Panjang gelombang:

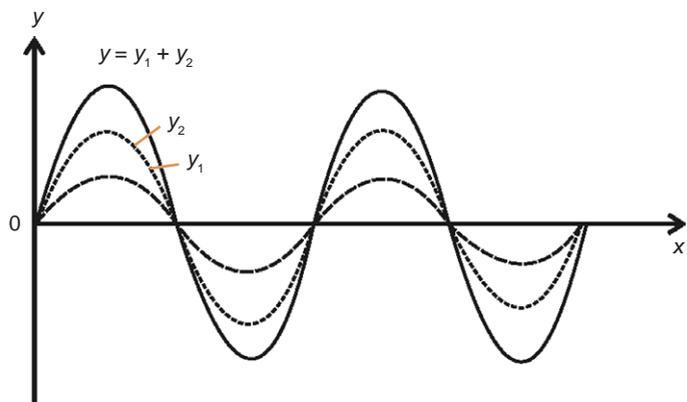
$$\lambda = \frac{2\pi}{8} = \frac{\pi}{4} = \frac{3,14}{4} = 0,785 \text{ m}$$

- f. Kecepatan gelombangnya:

$$v = \lambda f = 6 \text{ Hz} \times 0,785 \text{ m} = 4,71 \text{ m/s}$$

b. Superposisi Gelombang

Apabila dua gelombang atau lebih merambat pada medium yang sama. Maka, gelombang-gelombang tersebut akan datang di suatu titik pada saat yang sama sehingga terjadilah superposisi gelombang. Artinya, simpangan gelombang-gelombang tersebut di tiap titik dapat dijumlahkan sehingga akan menghasilkan sebuah gelombang



Gambar 1.6

Superposisi dua gelombang y_1 dan y_2 yang memiliki amplitudo berbeda.

baru.

Misalkan, simpangan getaran di suatu titik disebabkan oleh gelombang satu dan dua, yaitu y_1 dan y_2 . Kedua gelombang mempunyai amplitudo A dan frekuensi sudut yaitu ω yang sama dan merambat dari titik yang sama dengan arah sama pula. Persamaan superposisi dua gelombang tersebut dapat diturunkan persamaannya sebagai berikut.

$$y_1 = A \sin \omega t; y_2 = A \sin (\omega t + \Delta \theta)$$

Kedua gelombang di atas memiliki perbedaan sudut fase sebesar $\Delta \theta$.

Persamaan simpangan gelombang hasil superposisi kedua gelombang tersebut adalah

$$y = y_1 + y_2 = A \sin \omega t + A \sin (\omega t + \Delta \theta)$$

Dengan menggunakan aturan sinus, yaitu:

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \cos \frac{1}{2}(\alpha - \beta)$$

Karena cosinus merupakan fungsi genap, artinya

$$\cos \theta = \cos (-\theta)$$

sehingga persamaan dapat ditulis sebagai berikut.

$$y = 2A \sin \frac{1}{2}(\omega t + \Delta \theta + \omega t) \cos \frac{1}{2}(\omega t + \Delta \theta - \omega t)$$

$$y = 2A \sin \frac{1}{2}\left(\omega t + \frac{\Delta \theta}{2}\right) \cos \left(\frac{\Delta \theta}{2}\right)$$

Karena nilai beda fasenya ($\Delta \theta$) adalah tetap, persamaan getaran hasil superposisi dua gelombang dapat ditulis menjadi:

$$y = 2A \cos \left(\frac{\Delta \theta}{2}\right) \sin \left(\omega t + \frac{\Delta \theta}{2}\right)$$

dan $2A \cos \left(\frac{\Delta \theta}{2}\right)$ disebut amplitudo gelombang hasil superposisi.

Contoh Soal 1.4

Dua buah gelombang merambat pada medium yang sama dan arah getarnya sama. Persamaan getaran di suatu titik yang dihasilkan masing-masing gelombang adalah

$$y_1 = 0,5 \sin(\omega t)$$

$$y_2 = 0,5 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) \text{ cm}$$

Apabila $\omega = \frac{1}{2}\pi$ rad/s, tentukanlah:

- amplitudo gelombang interferensi;
- simpangan gelombang di titik tersebut setelah 1 sekon.

Jawab:

a. Amplitudo gelombang: $= 2A \cos\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)$; dengan $A = 0,5$ cm,

$$\Delta\theta = \frac{\pi}{3}$$

$$= 2(0,5) \left(\cos \frac{\pi}{6}\right) = 2(0,5) \cos 30^\circ$$

$$= 2(0,5) \left(\frac{1}{2}\sqrt{3}\right) = \frac{1}{2}\sqrt{3} \text{ cm}$$

- b. Simpangan gelombang jika $t = 1$ sekon:

$$y = 2A \cos\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\Delta\theta}{2}\right) = \frac{1}{2}\sqrt{3} \sin\left(\frac{1}{2}\pi \cdot 1 + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$y = \frac{1}{2}\sqrt{3} \sin\left(\frac{1}{2}\sqrt{3}\right) = \frac{3}{4} \text{ cm}$$

Perpaduan dua buah gelombang atau superposisi terjadi pula ketika gelombang datang dan gelombang pada sebuah tali yang bergetar secara terus-menerus dijumlahkan. Kedua gelombang yang memiliki amplitudo dan frekuensi sama serta berlawanan arah tersebut akan menghasilkan sebuah superposisi gelombang yang disebut gelombang stasioner atau gelombang diam.

c. Pemantulan Gelombang pada Tali

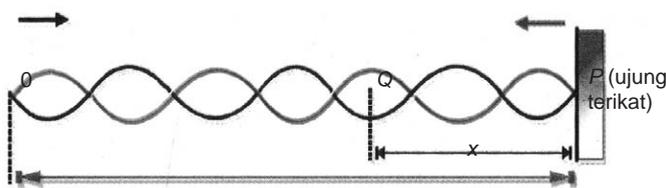
Coba Anda ikat tali pada sebuah tiang, lalu getarkan. Apa yang terjadi? Setelah mengenai tiang, tali tersebut akan

mengalami pemantulan (difraksi). Bentuk gelombang pantul yang terjadi baik pada ujung tali yang terikat atau ujung tali yang dapat bergerak bebas.

1) Pemantulan Gelombang pada Ujung Tali Terikat

Seutas tali yang ujungnya diikat pada tiang sehingga tidak dapat bergerak, ini dinamakan sebagai ujung terikat. Ujung tali lainnya digetarkan secara harmonik sehingga gelombang akan merambat menuju ujung lain yang terikat.

Panjang OP adalah l dan jarak titik Q dari ujung



Gambar 1.7

Oleh karena ujung tali O digerakkan naik turun gelombang pada tali akan merambat dari O ke Q (ke kanan) dengan kecepatan.

terikat P adalah x . Sekarang, tentukan bentuk persamaan gelombang di titik Q . Pada saat titik O telah digetarkan selama t sekon untuk gelombang datang, titik Q sudah bergetar selama

$$t_Q = t - \frac{OQ}{v}$$

Dengan $\frac{OQ}{v}$ adalah waktu yang diperlukan oleh gelombang datang untuk mencapai titik Q . Dari gambar, diperoleh $OQ = l - x$ sehingga persamaannya menjadi

$t_Q = t - \frac{(l-x)}{v}$. Persamaan gelombang datang di titik Q menjadi

$$y_d = A \sin \frac{2\pi t_Q}{T}$$

$$y_d = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{l-x}{v} \right)$$

$$y_d = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l-x}{vT} \right), \text{ dengan } vT = \lambda$$

$$y_d = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l-x}{\lambda} \right)$$

Bagaimana persamaan gelombang pantul y_P di titik Q ? Waktu yang diperlukan oleh gelombang yang merambat dari O ke P dan dipantulkan oleh P sehingga merambat

ke titik Q adalah $\frac{(l+x)}{v}$, jika P telah bergetar selama t ,

Q baru bergetar selama $t_Q = t - \frac{(l+x)}{v}$ karena jarak $OP +$ jarak $PQ = l+x$

Persamaan gelombang pantul di titik Q menjadi

$$y_P = A \sin \left(\frac{2\pi}{T} t_Q + 180^\circ \right) = -A \sin \frac{2\pi}{T} t_Q$$

Pada persamaan tersebut terjadi penambahan sudut fase gelombang sebesar 180° karena pada saat pemantulan di titik P terjadi pembalikan sudut fase gelombang sebesar 180° . Getaran gelombang yang arahnya semula ke atas pada saat pemantulan berbalik arah sehingga arah getarannya menjadi ke bawah. Hal ini menunjukkan terjadinya perubahan sudut fase $180^\circ = \pi$ rad. Dengan memasukkan

harga $t_Q = t - \frac{(l+x)}{v}$ pada persamaan gelombang pantul didapatkan persamaan gelombang pantul

$$y_P = -A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l+x}{vT} \right); \text{ dengan } vT = \lambda$$

$$y_P = -A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l+x}{vT} \right)$$

Superposisi gelombang datang dan gelombang pantul di titik Q akan menjadi

$$y = y_d + y_P$$

$$y = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l-x}{\lambda} \right) - A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l+x}{\lambda} \right)$$

Dengan menggunakan aturan pengurangan sinus.

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2 \sin \frac{1}{2}(\alpha - \beta) \cos \frac{1}{2}(\alpha + \beta)$$

Persamaan gelombang superposisi menjadi

$$y = 2A \sin 2\pi \frac{1}{2} \left[\left(\frac{t}{T} - \frac{l-x}{\lambda} \right) - \left(\frac{t}{T} - \frac{l+x}{\lambda} \right) \right]$$

$$\cos 2\pi \frac{1}{2} \left[\left(\frac{t}{T} - \frac{l-x}{\lambda} \right) + \left(\frac{t}{T} - \frac{l+x}{\lambda} \right) \right]$$

$$y = 2A \sin \pi \left(\frac{2x}{\lambda} \right) \cos \pi \left(\frac{2t}{T} - \frac{2l}{\lambda} \right)$$

Jadi, y adalah simpangan gelombang superposisi di titik Q akibat superposisi gelombang datang dan gelombang pantul dari ujung terikat. Amplitudo superposisi gelombangnya adalah

$$A_s = 2A \sin \pi \left(\frac{x}{\lambda} \right)$$

A_s adalah amplitudo gelombang superposisi pada pemantulan ujung tali terikat.

Dari persamaan amplitudo gelombang dapat ditentukan letak titik-titik simpul dan perut dari ujung tali terikat. Titik simpul adalah titik yang memiliki amplitudo minimum ($A_s = 0$) dan titik perut adalah titik yang memiliki amplitudo maksimum ($A_s = 2A$).

a) Menentukan Letak Simpul Gelombang

Simpul gelombang terbentuk pada saat

$$\sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) = 0$$

Sinus bernilai pada sudut fase $0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots, n\pi$ sehingga adakan diperoleh persamaan

$$\sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) = \sin n\pi, \text{ dengan } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Tempat terbentuknya simpul gelombang adalah

$$2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) = n\pi$$

$$x = \frac{n\lambda}{2} \text{ atau } x = \frac{2n\lambda}{4}, \text{ dengan } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Jadi, letak titik simpul dari ujung terikat merupakan kelipatan genap dari seperempat panjang gelombang.

b) Menentukan Letak Perut Gelombang

Perut gelombang terbentuk pada saat

$$\sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) = \pm 1$$

Hal ini berarti sinus bernilai ± 1 pada sudut fase $\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$

, $\frac{5\pi}{2}, \dots, \frac{(2n+1)\pi}{2}$ dengan $(2n+1)$ = bilangan ganjil untuk $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ sehingga tempat terbentuknya perut gelombang adalah

$$\sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) = \frac{\sin (2n+1)\pi}{2}$$

$$2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) = \frac{\sin (2n+1)\pi}{2} \quad \text{atau} \quad x = \frac{(2n+1)\lambda}{4}$$

dengan $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Jadi, letak titik perut dari ujung terikat merupakan kelipatan ganjil dari seperempat panjang gelombang.

2) Pemantulan Gelombang pada Ujung Tali Bebas

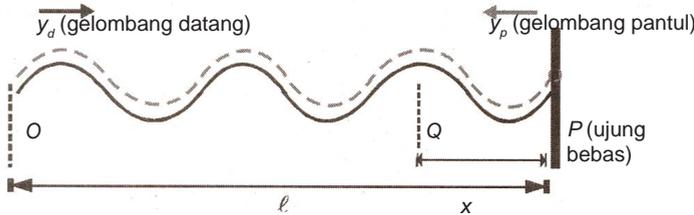
Persamaan gelombang datang di titik Q adalah

$$y_d = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l-x}{\lambda} \right)$$

Adapun persamaan gelombang pantul di titik Q adalah

$$y_p = A \sin 2\pi t_Q, \text{ dengan}$$

$$t_Q = \left(\frac{t}{T} - \frac{l+x}{\lambda} \right)$$



Gambar 1.8

Simpangan gelombang datang (y_d) dan simpangan gelombang pantul (y_p) pada ujung bebas.

Gelombang pantul tidak mengalami perubahan sudut fase seperti pada pemantulan ujung bebas dapat bergerak secara bebas sehingga ketika terjadi pemantulan, sudut fasenya tetap atau tidak mengalami perubahan. Persamaan gelombang pantul pada ujung tali bebas akan menjadi

$$y_p = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{l+x}{v} \right), \text{ dengan } vT = \lambda$$

Persamaan gelombang pantul dapat ditulis sebagai berikut.

$$y_p = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l+x}{\lambda} \right)$$

Persamaan gelombang superposisi dari gelombang datang dan gelombang pantul pada ujung tali bebas adalah

$$y = y_d + y_p$$

$$y = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l-x}{\lambda} \right) - A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l+x}{\lambda} \right)$$

Aturan penjumlahan sinus.

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{1}{2}(\alpha + \beta) \cos \frac{1}{2}(\alpha - \beta)$$

Persamaan superposisi pada ujung tali bebas menjadi

$$y = 2A \sin 2\pi \frac{1}{2} \left(\frac{t}{T} - \frac{l-x}{\lambda} + \frac{t}{T} - \frac{l+x}{\lambda} \right)$$

$$\cos 2\pi \frac{1}{2} \left(\frac{t}{T} - \frac{l-x}{\lambda} - \frac{t}{T} + \frac{l+x}{\lambda} \right)$$

$$y = 2A \sin \pi \left(\frac{2t}{T} - \frac{2l}{\lambda} \right) \cos \pi \left(\frac{2x}{\lambda} \right)$$

Persamaan simpangan superposisi gelombang di titik Q dapat dituliskan menjadi

$$y = 2A \cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda} \right)$$

Dengan $A_s = 2A \cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right)$ disebut sebagai amplitudo superposisi gelombang pada pemantulan ujung tali bebas.

a) Menentukan Letak Simpul Gelombang

Untuk menentukan letak titik simpul gelombang

$$A_s = 2A \cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) = 0$$

Cosinus sudut memiliki nilai nol untuk sudut fase $0, \pi/2, 3$

$\frac{(2n+1)\pi}{2}, \dots,$ sehingga akan diperoleh persamaan

$$\cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) = \cos (2n+1) \frac{\pi}{2}$$

$$2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) = (2n+1) \frac{\pi}{2}$$

$$x = (2n+1) \frac{1}{4} \lambda, \text{ dengan } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Jadi, letak titik simpul dari ujung bebas merupakan kelipatan ganjildari seperempat panjang gelombang.

b) Menentukan Letak Perut Gelombang

Letak titik perut gelombang akan terjadi apabila

$$\cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) = \pm 1$$

Cosinus memiliki nilai ± 1 untuk sudut fase bernilai $0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots, n\pi$ sehingga akan diperoleh

$$\cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) = \cos n\pi$$

$$2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) = n\pi$$

$$x = \frac{n\lambda}{2} \text{ atau } x = (2n) \frac{1}{4} \lambda, \text{ dengan } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

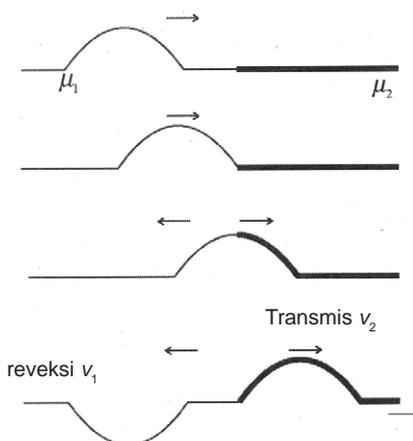
Jadi, letak titik perut dari ujung bebas merupakan kelipatan genap dari seperempat panjang gelombang.

3) Refleksi dan Transmisi Gelombang pada Sambungan Tali

Ketika gelombang yang merambat pada sebuah medium bertemu penghalang atau rintangan maka gelombang dapat mengalami transmisi (diteruskan) atau dapat mengalami refleksi (pemantulan) atau juga mengalami keduanya.

Tegangan pada kedua tali, baik tali tipis maupun tali tebal adalah sama sehingga perbandingan kecepatan perambatan gelombang pada kedua tali, hanya ditentukan oleh massa jenis masing-masing tali.

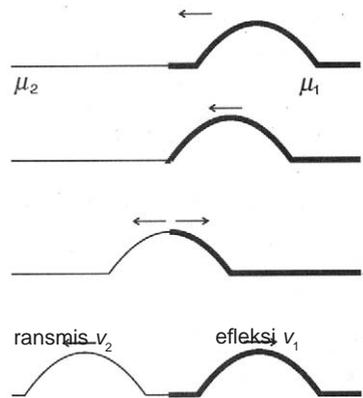
Untuk mengetahui apakah gelombang tersebut mengalami transmisi atau refleksi, perhatikan gambar berikut ini.



Gambar 1.9

Transmisi dan refleksi pulsa gelombang daritali tipis ke tali tebal.

Sebuah pulsa merambat ke kanan dari tali tipis dengan massa jenis μ_1 ke tali yang lebih tebal dengan massa jenis μ_2 . Setelah pulsa menemui rintangan atau halangan yaitu titik batas antara tali tipis dan tali tebal, pulsa tersebut ada yang dipantulkan dan ada pula yang diteruskan. Dari pengamatan dapat diperoleh bahwa pulsa yang dipantulkan mengalami perubahan sudut fase sebesar π , sedangkan pulsa transmisi tidak mengalami perubahan fase. Peristiwa ini sama dengan pemantulan gelombang pada ujung tali terikat dengan anggapan massa jenis tali tebal μ_2 tidak berhingga. Kecepatan perambatan pulsa pada tali tebal yaitu kecepatan pulsa transmisi lebih rendah dibandingkan kecepatan pulsa pada tali tipis, yaitu pulsa pantul. Sekarang perhatikan gambar berikut.



Gambar 1.10

Transmisi dan refleksi pulsa gelombang dari tali tebal ke tali tipis.

Sebuah pulsa merambat ke kiri dari tali tebal dengan massa jenis μ_1 ke tali lebih tipis dengan massa jenis μ_2 . Ketika pulsa sampai pada titik batas tali tebal-tipis, pulsa tersebut ada yang dipantulkan dan ada pula yang diteruskan. Akan tetapi, pada saat mengalami pemantulan, pulsa pantul tidak mengalami perubahan fase. Demikian juga dengan pulsa transmisi tidak mengalami perubahan fase. Dari hasil pengamatan maka diperoleh bahwa kecepatan perambatan pulsa pada tali tipis lebih besar daripada kecepatan pada tali tebal.

Secara umum, persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

$$v_1 : v_2 = \sqrt{\frac{F}{\mu_1}} : \sqrt{\frac{F}{\mu_2}} = \frac{1}{\mu_1} : \frac{1}{\mu_2}$$

Untuk gelombang sinus yang datang dari tali ringan dengan titik sambungan diambil pada saat $x = 0$ maka akan berlaku persamaan sebagai berikut.

$$y_d = A_d \cos(k_1 x - \omega t)$$

$$y_p = A_p \cos(-k_1 x - \omega t + \pi)$$

$$y_1 = A_1 \cos(k_2 x - \omega t)$$

dengan:

y_d = gelombang datang

y_p = gelombang pantul

y_1 = gelombang transmisi

$$k_1 = \frac{\omega}{v_1} \quad k_2 = \frac{\omega}{v_2}$$

dan

Dengan menggunakan syarat kontinuitas pada titik sambungan maka berlaku persamaan

$$k_1 A_d + k_1 A_p = k_2 A_1$$

$$\frac{\omega}{v_1} A_d + \frac{\omega}{v_1} A_p = \frac{\omega}{v_2} A_1$$

$$\frac{A_d}{v_1} + \frac{A_p}{v_1} = \frac{A_1}{v_2}$$

Karena $(A_d - A_p) = A_1$ maka persamaan tersebut akan menjadi

$$A_p = \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2} A_d$$

$$A_1 = \frac{2v_2}{v_1 + v_2} A_d$$

Sebaliknya apabila gelombang dari tali yang lebih tebal ke tali yang lebih ringan (tipis), persamaan amplitudo gelombang pantulnya akan menjadi:

$$A_p = \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2} A_d$$

Oleh karena v_2 lebih besar daripada v_1 tidak terjadi pembalikan fase, tetapi persamaan amplitudo gelombang transmisinya tetap.

Untuk menentukan koefisien refleksi dan koefisien transmisi terhadap gelombang datang maka persamaan yang digunakan adalah

Koefisien refleksi (pantulan) gelombang :

$$\frac{A_p}{A_d} = \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2}$$

Koefisien transmisi (terusan) gelombang :

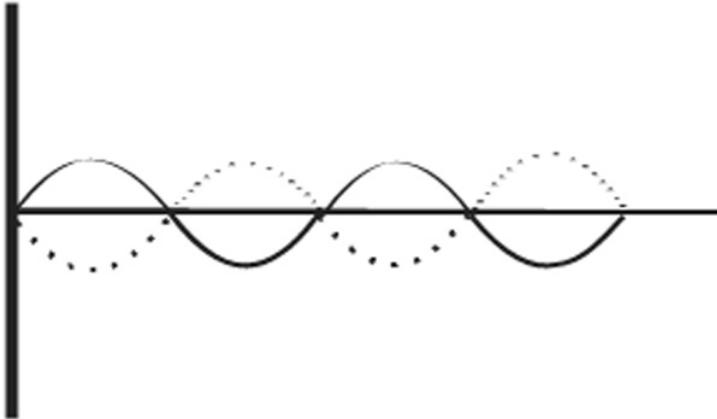
$$\frac{A_1}{A_d} = \frac{2v_2}{v_1 + v_2}$$

Dengan $\frac{A_p}{A_d}$ disebut sebagai koefisien refleksi gelombang, sedangkan $\frac{A_1}{A_d}$ disebut sebagai koefisien transmisi gelombang.

d. Gelombang Stasioner

Coba Anda perhatikan pada seutas tali yang digetarkan pada salah satu ujungnya dengan ujung tali yang lainnya diikat sehingga tidak dapat bergerak. Ujung tali yang diikat ini selalu merupakan simpul gelombang karena tidak dapat bergetar. Jika ujung tali yang bebas digetarkan secara terus-menerus, gelombang akan merambat sampai ke ujung tetap yang terikat. Kemudian, gelombang tersebut akan dipantulkan. Gelombang datang dan gelombang pantul bersuperposisi, di suatu titik akan mengalami superposisi yang menguatkan dan di titik yang lain akan mengalami superposisi yang melemahkan. Pada keadaan tertentu maka akan terbentuk gelombang stasioner atau gelombang diam.

Pada titik tempat terjadinya superposisi yang menguatkan maka amplitudo getarnya dua kali amplitudo gelombang datang dan bernilai positif. Titik ini dinamakan titik perut, sedangkan pada tali terdapat titik yang tampak tidak bergerak dan titik tersebut dinamakan titik simpul.



Gambar1.12

Terbentuknya gelombang stasioner dariujung tali terikat.

Dari gambar di atas kita dapat memperoleh penjelasan sebagai berikut.

- a. Pada gelombang stasioner, ada titik-titik ketika kedua gelombang sefase yang menghasilkan titik perut dengan amplitudo $2A$ ($A =$ amplitudo gelombang datang).
- b. Pada gelombang stasioner, ada titik-titik ketika kedua gelombang berlawanan fase yang menghasilkan titik simpul dengan amplitudo nol.

Jika dibuatkan bentuk persamaan matematisnya akan diperoleh tempat terbentuknya simpul dan perut yang diukur dari ujung pemantulannya sebagai berikut.

- 1) Tempat simpul (S) dari ujung pemantulan.

$$S = 0, \frac{1}{2}\lambda, \lambda, \frac{3}{2}\lambda, 2\lambda, \text{ dan seterusnya}$$

$$S = n\left(\frac{1}{2}\lambda\right), \text{ dengan } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

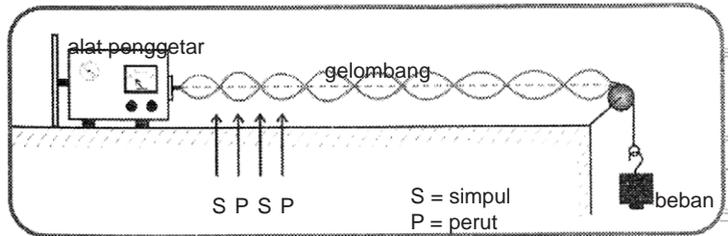
- 2) Tempat perut (P) dari ujung pemantulan.

$$P = \frac{1}{4}\lambda, \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda, \frac{7}{4}\lambda, \text{ dan seterusnya}$$

$$P = (2n-1)\left(\frac{1}{4}\lambda\right), \text{ dengan } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

1) Gelombang Stasioner pada Dawai

Untuk menentukan kecepatan perambatan gelombang pada dawai, Melde melakukan percobaan dengan memakai alat seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 1.13

Percobaan Melde

Dari hasil percobaan Melde mendapat suatu kesimpulan sebagai berikut.

- Untuk panjang dawai yang tetap maka kecepatan perambatan gelombang berbanding terbalik dengan massa dawai.
- Untuk massa dawai tetap, cepat rambat gelombang berbanding lurus dengan akar panjang dawai.
- Cepat rambat gelombang dalam dawai berbanding lurus dengan akar tegangan dawai.

Persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{Fl}{m}} = \sqrt{\frac{F}{\frac{m}{l}}}$$

$$\frac{m}{l} = \mu$$

Dengan $\frac{m}{l}$ disebut sebagai massa per satuan panjang kawat

Maka, persamaannya menjadi:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

dengan F dalam Newton (N) dan μ dalam kg/m.

Jadi, kecepatan perambatan gelombang pada dawai adalah berbanding lurus dengan akar tegangan kawat dan berbanding terbalik dengan akar massa kawat per satuan panjang.

Contoh Soal 1.5

Seutas dawai yang panjangnya 1 meter dan massanya 25 gram ditegangkan dengan gaya sebesar 2,5 N. Salah satu ujungnya digetarkan sehingga gelombang stasioner. Tentukan cepat rambat gelombang.

Jawab:

Panjang dawai $l = 1 \text{ m}$

Massa dawai $m = 25 \text{ g} = 25 \times 10^{-3} \text{ kg}$

Gaya tegangan $F = 2,5 \text{ N}$

Massa per satuan panjang μ dihitung dengan persamaan

$$\mu = \frac{m}{l} = \frac{25 \times 10^{-3} \text{ kg}}{1 \text{ m}} = 25 \times 10^{-3} \text{ kg/m}$$

Cepat rambat gelombang v dihitung dengan persamaan

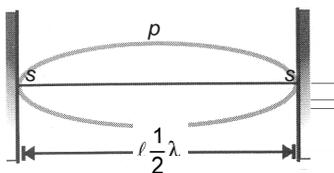
$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{2,5 \text{ N}}{25 \times 10^{-3} \text{ kg/m}}} = \sqrt{10^2} \text{ m/s} = 10 \text{ m/s}$$

Getaran yang dihasilkan dari gitar, biola, ataupun kecapi merupakan getaran dawai. Hal ini diselidiki oleh Mersene dengan menunjukkan persamaan berikut ini.

a) Nada Dasar atau Harmonik Pertama

Jika sebuah dawai digetarkan dan membentuk pola seperti gambar berikut.

Dawai akan menghasilkan nada dasar atau disebut



Gambar 6.13

Nada dasar atau nada harmonik pertama.

harmonik pertama

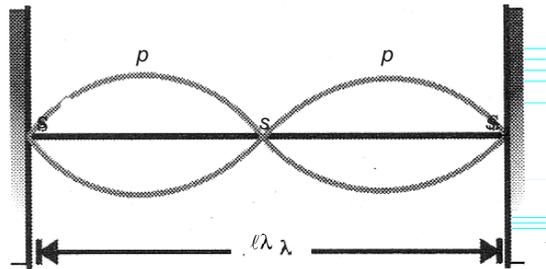
$$l = \frac{1}{2} \lambda \rightarrow \lambda = 2l$$

sehingga frekuensinya menjadi $f_0 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l}$

b) Nada atas pertama atau harmonik kedua

Pola getaran dawai gambar berikut ini akan menghasilkan nada atas pertama atau disebut juga harmonik kedua dengan $l = \lambda$ dan $f = 2f_0$ harmonik pertama

sehingga frekuensinya : $f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{l} = 2f_0$



Gambar 1.14

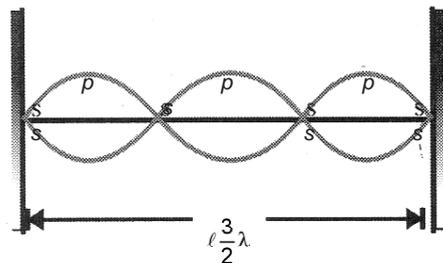
Nada atas pertama atau nada harmonik kedua.

c) Nada atas pertama kedua

Pola getaran dawai pada gambar berikut ini disebut menghasilkan nada atas kedua

$l = \frac{3}{2}\lambda \rightarrow \lambda = \frac{2l}{3}$ sehingga frekuensinya:

$f_2 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{\frac{2l}{3}} = \frac{3v}{2l}$



Gambar 1.14

Nada atas kedua atau nada harmonik ketiga.

Dengan demikian, perbandingan antara frekuensi nada-nada pada dawai adalah sebagai berikut.

$f_0 : f_1 : f_2 = \frac{v}{2l} : \frac{v}{l} : \frac{3v}{2l} = 1 : 2 : 3$

Perbandingan frekuensi tersebut merupakan bilangan-bilangan bulat. Telah diketahui kecepatan perambatan

gelombang pada dawai adalah $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$. Maka,

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} = fh_1$$

a) frekuensi nada dasar :

b) frekuensi nada atas pertama : $f_1 = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} = fh_2$

c) frekuensi nada atas kedua : $f_3 = \frac{3}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}} = fh_3$

Secara umum, persamaan frekuensi sebuah dawai menjadi:

$$f_n = \frac{n+1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

dengan $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

2) Gelombang Stasioner pada Pipa Organa

Jika kita perhatikan alat-alat musik seperti seruling, terompet, klarinet, dan sebagainya maka getaran dari molekul-molekul udara dalam kolom udara dapat merupakan sumber bunyi. Kolom udara yang paling sederhana yang dipakai sebagai alat musik adalah pipa organa. Pipa organa ini ada dua macam, yaitu pipa organa terbuka dan pipa organa tertutup.

a) Pipa Organa Terbuka

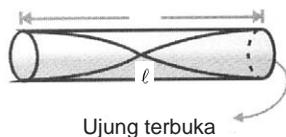
Pipa organa terbuka merupakan sebuah kolom udara atau tabung yang kedua ujungnya terbuka. Kedua ujungnya menjadi perut (bebas bergerak) di tengahnya simpul.

$$l = \frac{1}{2} \lambda \rightarrow \lambda = 2l$$

(1) Nada dasar:

Gelombang seperti gambar berikut menghasilkan nada

dasar dengan frekuensi: $f_0 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l} = fh_1$



Gambar 1.16

Nada dasar atau nada harmonik pertama.

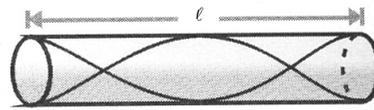
(2) Nada atas pertama: $l = \lambda$

Gelombang seperti gambar berikut menghasilkan nada atas pertama dengan frekuensi:

$$f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{l} = fh_2 = 2fh_1$$

Gambar 1.17

Nada atas pertama atau nada harmonik kedua.



$$l = \frac{3}{2}\lambda \rightarrow \lambda = \frac{2l}{3}$$

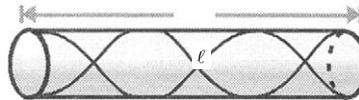
(3) Nada atas kedua:

Pola gelombang seperti berikut menghasilkan nada atas kedua dengan frekuensi:

$$f_2 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{\frac{2l}{3}} = \frac{3v}{2l} = fh_3 = 3fh_1$$

Gambar 1.18

Nada atas kedua atau nada harmonik ketiga.



Dengan demikian, diperoleh perbandingan antara frekuensi nada-nada pada pipa organa terbuka, yaitu:

$$f_0 : f_1 : f_2 = \frac{v}{2l} : \frac{v}{l} : \frac{3v}{2l} = 1 : 2 : 3 \quad \text{atau}$$

$$fh_1 = fh_2 = fh_3 = 1 : 2 : 3$$

Secara umum, bentuk persamaan frekuensi harmonik dari pipa organa terbuka dapat ditulis persamaannya sebagai berikut.

$$f_n = \left(\frac{n+1}{2l} \right) v$$

dengan $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Perbandingan frekuensi nada-nada pada pipa organa terbuka merupakan perbandingan bilangan-bilangan bulat.

b) Pipa organa tertutup

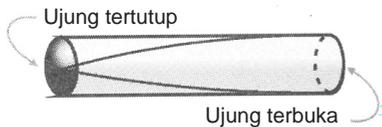
Pipa organa tertutup merupakan sebuah kolom udara atau tabung yang salah satu ujungnya tertutup (menjadi simpul karena tidak bebas bergerak) dan ujung lainnya terbuka (menjadi perut).

$$l = \frac{1}{4}\lambda \rightarrow \lambda = 4l$$

(1) Nada dasar:

Gelombang seperti gambar berikut menghasilkan nada dasar dengan frekuensi:

$$f_0 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4l} = fh_1$$



Gambar 1.19

Nada dasar atau nada harmonik pertama.

$$l = \frac{3}{4}\lambda \rightarrow \lambda = \frac{4}{3}l$$

(2) Nada atas pertama:

Gelombang seperti gambar berikut menghasilkan nada

$$f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{\frac{4l}{3}} = \frac{3v}{4l}$$

atas pertama dengan frekuensi:



Gambar 1.20

Nada atas pertama atau nada harmonik kedua.

$$l = \frac{5}{4}\lambda \rightarrow \lambda = \frac{4}{5}l$$

(3) Nada atas kedua:

Pola gelombang seperti gambar berikut menghasilkan

nada atas kedua dengan frekuensi: $f_2 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{\frac{4l}{5}} = \frac{5v}{4l}$



Gambar 1.21

Nada atas kedua atau nada harmonik ketiga.

Dengan demikian, untuk nilai kecepatan perambatan gelombang yang sama akan diperoleh perbandingan antara frekuensi nada-nada pada pipa organa tertutup, yaitu

$$f_0 : f_1 : f_2 = \frac{v}{4l} : \frac{3v}{4l} : \frac{5v}{4l} = 1 : 3 : 5$$

Jadi, Anda akan memperoleh perbandingan frekuensi harmoniknya merupakan bilangan ganjil dengan $f_0 : f_1 : f_2 = 1 : 3 : 5$. Perbandingan frekuensi nada-nada pada pipa organa tertutup merupakan perbandingan bilangan-bilangan ganjil.

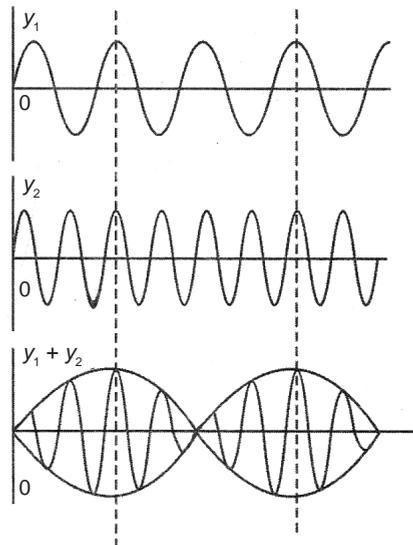
Secara umum, bentuk persamaan frekuensi harmonik dari pipa organa tertutup dapat ditulis persamaannya sebagai berikut.

$$f_n = \left(\frac{2n+1}{4l} \right) v$$

dengan $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

e. Peristiwa Pelayangan Gelombang

Peristiwa pelayangan adalah peristiwa penguatan dan pelemahan bunyi akibat superposisi dua gelombang yang amplitudo dan arahnya tidak perlu sama dan getaran yang ditimbulkannya di setiap titik berbeda frekuensinya.



Gambar 1.22

Pelayangan Gelombang

Coba kita tinjau sebuah titik yang dilalui dua gelombang yang menyebabkan terjadinya peristiwa pelayangan gelombang ini. Titik akan mengalami simpangan akibat gelombang pertama (dengan frekuensi f_1) dengan persamaan sebagai berikut.

$$y_1 = A \sin 2\pi f_1 t$$

dan simpangan oleh gelombang kedua (frekuensi f_2) memenuhi persamaan:

$$y_2 = A \sin 2\pi f_2 t$$

sehingga superposisi simpangan itu adalah:

$$y = y_1 + y_2 = A [\sin 2\pi f_1 t + \sin 2\pi f_2 t]$$

dengan menggunakan aturan sinus maka akan diperoleh:

$$y = 2A \sin \left[\frac{(2\pi f_1 + 2\pi f_2)t}{2} \right] \cos \left[\frac{(2\pi f_2 - 2\pi f_1)t}{2} \right]$$

dengan $2\pi f_1 = \omega_1$ dan $2\pi f_2 = \omega_2$.

Dengan demikian, diperoleh persamaan peristiwa pelayangan gelombang

$$y = 2A \sin \left[\frac{(\omega_1 + \omega_2)t}{2} \right] \cos \left[\frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2} \right]$$

$$y = 2A \cos \left[\frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2} \right] \sin \left[\frac{(\omega_1 + \omega_2)t}{2} \right] = A_p \sin \bar{\omega} t$$

dengan $A_p = 2A \cos \left[\frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2} \right]$ dan $\bar{\omega} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$

Bentuk persamaan $A_p = 2A \cos \left[\frac{(\omega_2 - \omega_1)t}{2} \right]$ dapat diubah

$$A_p = 2A \cos 2\pi \left[\frac{f_2 - f_1}{2} t \right]$$

menjadi A_p memiliki nilai antara $2A$ dan $-2A$. Perubahan amplitudo ini memiliki frekuensi sebesar $\frac{(f_2 - f_1)}{2}$.

Frekuensi perubahan amplitudo ini jelas terdengar jika nilai $f_2 - f_1$ tidak besar. Maka, nilai $f_2 - f_1$ inilah yang disebut frekuensi pelayangan. Jadi, frekuensi pelayangan dirumuskan sebagai berikut.

$$f_p = f_2 - f_1$$

dengan nilai $f_2 > f_1$

f. Intensitas dan Energi Gelombang

1) Intensitas Gelombang

Intensitas gelombang didefinisikan sebagai jumlah energi bunyi per satuan waktu (daya) yang menembus tegak lurus suatu bidang per satuan luas.

Hubungan antara daya, luas, dan intensitas memenuhi persamaan sebagai berikut.

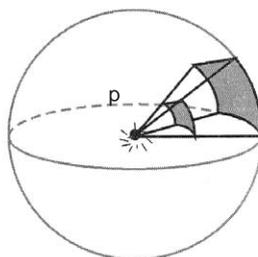
$$I = \frac{P}{A}$$

dengan:

P = daya atau energi gelombang per satuan waktu (watt)

A = luas bidang (m^2)

I = intensitas gelombang (W/m^2)



Gambar 1.23

Bidang permukaan bola intensitas gelombang sama.

Apabila sumber gelombang berupa sebuah sumber titik yang memancar serba sama ke segala arah dan mediumnya juga serba sama. Luas bidang pendengaran yang memiliki intensitas yang sama berupa kulit bola, seperti yang terlihat pada gambar. Maka, intensitas bunyi pada bidang permukaan dalam bola yang memiliki jari-jari R memenuhi persamaan sebagai berikut.

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi R^2}$$

Dari persamaan di atas dapat dilihat intensitas bunyi berbanding terbalik dengan kuadrat jarak sumber bunyi ke bidang pendengaran.

Batas intensitas bunyi yang terdengar oleh telinga manusia normal sebagai berikut.

- Intensitas terkecil yang masih dapat menimbulkan rangsangan pendengaran pada telinga adalah $10^{-16} \text{ W}/\text{cm}^2$ ($10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$) pada frekuensi 1.000 Hz yang disebut intensitas ambang pendengaran.

- b) Intensitas terbesar yang masih dapat diterima telinga manusia tanpa rasa sakit adalah sebesar $10^{-4} \text{ W/cm}^2 = 1 \text{ W/m}^2$.

Jadi, batas pendengaran terendah adalah 10^{-16} W/cm^2 atau 10^{-12} W/m^2 dan batas tertinggi adalah 10^{-4} W/cm^2 atau 1 W/m^2 .

g. Energi Gelombang

Gelombang memindahkan energi dari satu tempat ke tempat lain. Ketika gelombang melalui medium, energi dipindahkan dalam bentuk energi getaran dari partikel satu ke partikel lain dalam medium. Untuk gelombang sinusoidal dengan frekuensi f , partikel-partikel bergetar harmonik sederhana ketika gelombang melalui partikel-partikel tersebut sehingga setiap partikel memiliki energi

$E = \frac{1}{2}ky^2$, dengan y adalah amplitudo gerak partikel. Kita dapat menyatakan k dalam frekuensi f .

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$f^2 = \frac{1}{4\pi^2} \frac{k}{m} \quad \text{atau} \quad k = 4\pi^2 mf^2$$

Oleh karena itu,

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

$$E = \frac{1}{2}(4\pi^2 mf^2)y^2$$

$$E = 2\pi^2 mf^2 y^2$$

Massa m adalah hasil kali massa jenis ρ dengan volum ($m = \rho V$). Volum V adalah hasil kali luas penampang A dengan jarak yang ditempuh gelombang ($V = Al$). Jarak yang ditempuh gelombang dalam waktu t adalah hasil kali cepat rambat gelombang v dengan waktu tempuh t ($l = vt$). Karena itu, massa m dapat kita nyatakan dengan persamaan:

$$m = \rho V = \rho (Al) = \rho A(vt)$$

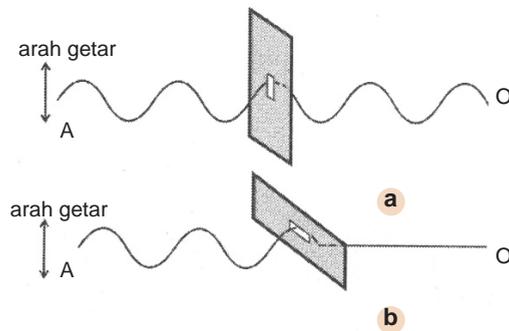
Jika nilai m kita masukkan ke persamaan $E = 2\pi^2 mf^2 y^2$, kita peroleh:

$$E = 2\pi^2 (\rho Avt) f^2 y^2$$

Persamaan di atas menyatakan bahwa energi yang dipindahkan oleh suatu gelombang sebanding dengan kuadrat amplitudonya ($E \propto y^2$).

h. Polarisasi pada Gelombang Tali

Hampir semua gelombang mengalami apa yang dinamakan peristiwa polarisasi. Perhatikan gambar berikut ini.



Gambar 1.24

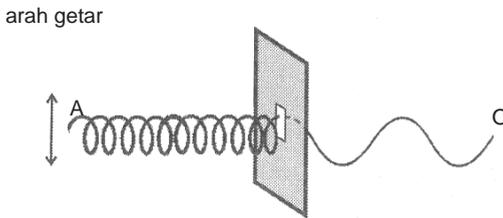
Gelombang tali digetarkan pada
 a. celah vertikal;
 b. celah horizontal.

Coba Anda ikatkan sutas tali pada titik O di dinding, lalu masukkan ujung tali lain, yaitu ujung A ke dalam sebuah celah. Pasang celah dalam posisi vertikal, lalu getarkan ujung tali A sehingga gelombang transversal yang merambat dari A dapat menembus celah dan sampai di titik O .

Sekarang, coba ubahlah posisi celah menjadi horizontal, lalu getarkan kembali ujung tali A secara vertikal. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa gelombang vertikal tidak dapat menembus celah. Jika tali di titik A digetarkan berputar, artinya digetarkan ke segala arah dan celah dipasang vertika, apa yang terjadi? Ternyata, gelombang dapat menembus celah dengan arah getaran gelombang yang sama dengan arah posisi celah, yaitu arah vertikal. Apa yang Anda dapat pahami dari peristiwa tersebut?

Pada peristiwa yang telah diuraikan di atas menunjukkan terjadinya polarisasi pada gelombang tali yang melewati sebuah celah sempit dengan arah polarisasi

gelombang sesuai dengan arah celahnya. Polarisasi dapat diartikan sebagai penyearah gerak getaran gelombang. Jika gelombang bergetar ke segala arah, setelah melewati sebuah celah, arah getaran gelombang menjadi satu arah getar saja yang disebut dengan gelombang terpolarisasi.



Gambar 1.25

Gelombang tali terpolarisasi linear.

3. Gelombang Dua Dimensi

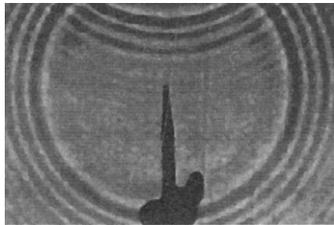
Secara umum sifat-sifat gelombang adalah sebagai berikut.

- Gelombang dapat mengalami pemantulan (refleksi)
- Gelombang dapat mengalami pembiasan (refraksi)
- Gelombang dapat mengalami pemantulan (interferensi)
- Gelombang dapat mengalami pemantulan (difraksi)
- Gelombang dapat mengalami pemantulan (polarisasi)

a. Pemantulan dan Pembiasan Gelombang

1) Pemantulan Gelombang

Coba Anda perhatikan sebuah tangki riak. Tangki riak adalah sebuah tangki berisi air yang diberikan usikan atau gangguan sehingga akan menimbulkan riak gelombang yang merambat ke dinding tangki. Riak gelombang yang timbul kemudian dipantulkan kembali oleh dinding tangki.



Gambar 1.26

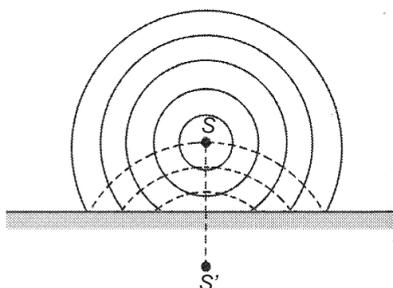
Pemantulan gelombang pada tangki riak.

Gelombang datang pada tangki riak berupa gelombang lingkaran dengan sudut pusat adalah sumber gelombang S. Gelombang pantul yang dihasilkan oleh bidang lurus juga berupa gelombang lingkaran dengan S' sebagai pusat lingkaran. Jarak S ke bidang pantul dengan jarak S' ke bidang pantul.

Menurut Hukum Snellius, gelombang datang, gelombang pantul, dan garis normal berada pada satu bidang dan sudut datang akan sama dengan sudut pantul.

Gambar 1.27

S = sumber gambar
S' = bayangan sumber gelombang



2) Pembiasan Gelombang

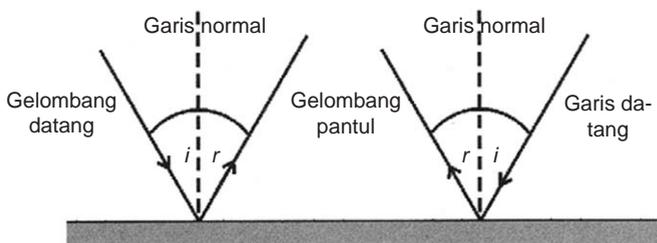
Masih ingatkah Anda mengenai pembiasan? Pembelokkan arah perambatan gelombang dapat terjadi jika gelombang tersebut melewati bidang dua medium yang memiliki indeks bias yang berbeda. Contohnya gelombang cahaya yang merambat dari udara ke air akan mengalami pembelokkan. Pembelokkan arah perambatan gelombang disebut pembiasan gelombang.

Menurut **Hukum Snellius** tentang pembiasan menyatakan sebagai berikut.

- Sinar datang, garis normal, dan sinar bias, terletak pada satu bidang datar.
- Sinar yang datang dari medium dengan indeks bias kecil ke medium dengan indeks bias yang lebih besar dibiaskan mendekati garis normal dan sebaliknya.
- Perbandingan sinus sudut ($\sin i$) terhadap sinus sudut bias ($\sin r$) dari satu medium ke medium lainnya selalu tetap. Perbandingan ini disebut sebagai indeks bias relatif suatu medium terhadap medium lain.

Gambar 1.28

Pemantulan gelombang cahaya. Sudut datang i sama dengan sudut pantul.

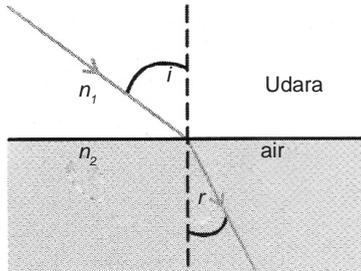


Hukum Snellius dapat ditulis persamaannya sebagai berikut.

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r$$

dengan n_1 adalah indeks bias medium pertama, n_2 adalah indeks bias medium kedua, i adalah sudut datang, dan r adalah sudut bias.

Indeks bias mutlak suatu medium didefinisikan sebagai berikut.



Gambar 1.29

Pembiasan gelombang dari udara ke air.

$$n = \frac{c}{v}$$

dengan:

c = laju cahaya di ruang hampa

v = laju cahaya dalam suatu medium

Indeks bias relatif suatu medium (n_2) terhadap medium lainnya (n_1) didefinisikan sebagai perbandingan tetap antara sinus sudut datang terhadap sinus sudut bias pada peralihan cahaya dari medium 1 (n_1) ke medium 2 (n_2).

$$n_{21} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

dengan n_{21} didefinisikan sebagai indeks bias medium (2) relatif terhadap indeks bias medium (1). Apabila cahaya datang dari ruang hampa ($n_1 = 1$) ke dalam air (n_2), indeks bias n_2 menjadi indeks mutlak dan dapat ditulis persamaannya sebagai berikut.

$$n_2 = \frac{\sin i}{\sin r}$$

Pada peristiwa pembiasan juga mengalami perbedaan panjang gelombang. Persamaannya dapat diturunkan sebagai berikut.

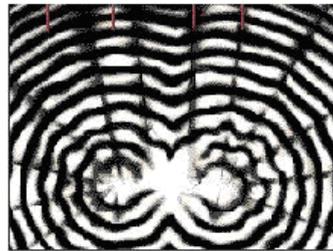
$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{f\lambda_1}{f\lambda_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Dari medium satu ke medium lainnya, frekuensi gelombang tetap. Jadi, yang mengalami perubahan adalah kecepatan dan panjang gelombang.

b. Interferensi Gelombang

Dua gelombang disebut sefase apabila kedua gelombang tersebut memiliki frekuensi sama dan pada setiap saat yang sama memiliki arah simpangan yang sama pula. Adapun dua gelombang disebut berlawanan fase apabila kedua gelombang tersebut memiliki frekuensi sama dan pada setiap saat yang sama memiliki arah simpangan yang berlawanan.

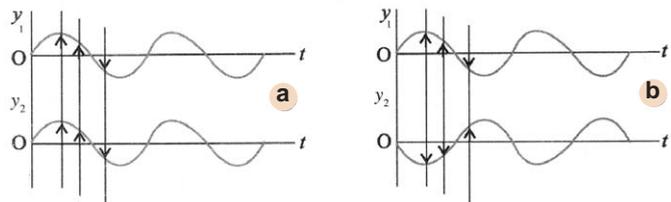
Untuk mengamati peristiwa interferensi dua gelombang dapat digunakan tangki riak.



Gambar 1.30

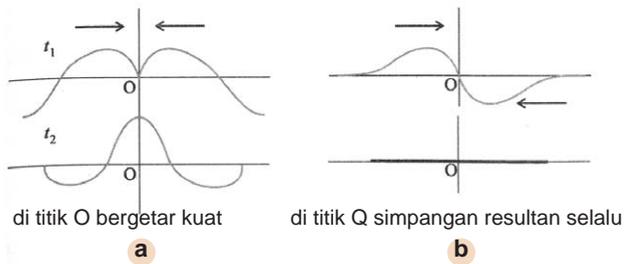
Interferensi gelombang pada tali riak.

Dalam sebuah tangki yang berisi air digetarkan dua gelombang permukaan. Kedua gelombang tersebut akan merambat sehingga satu sama lain akan bertemu. Pertemuan kedua gelombang tersebut akan mengalami interferensi. Jika pertemuan kedua gelombang tersebut saling menguatkan disebut interferensi maksimum atau interferensi konstruktif. Peristiwa ini terjadi jika pada titik pertemuan tersebut kedua gelombang sefase. Akan tetapi, jika pertemuan gelombang saling melemahkan disebut interferensi minimum atau interferensi destruktif. Peristiwa ini terjadi jika pada titik pertemuan tersebut kedua gelombangnya berlawanan fase.



Gambar 1.31

a. Dua gelombang sefase
b. Dua gelombang berlawanan fase



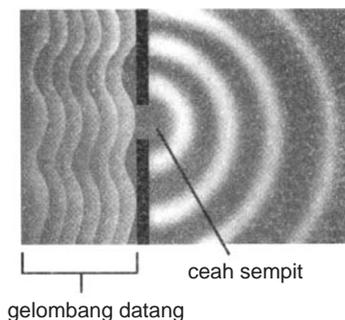
Gambar 1.32

Interferensi gelombang pada tali riak

(a)interferensi maksimum (b) interferensi minimum

c. Difraksi Gelombang

Peristiwa difraksi atau lenturan dapat terjadi jika sebuah gelombang melewati sebuah penghalang atau melewati sebuah celah sempit. Pada suatu medium yang serba sama, gelombang akan merambat lurus. Akan tetapi, jika pada medium itu gelombang terhalangi, bentuk dan arah perambatannya dapat berubah.



Gambar1.33

Gelombang permukaan air-mengalamidifraksi oleh celah sempit.

Perhatikan gambar berikut!

Sebuah gelombang pada permukaan air merambat lurus. Lalu, gelombang tersebut terhalang oleh sebuah penghalang yang memiliki sebuah celah sempit. Gelombang akan merambat melewati celah sempit tersebut. Celah sempit seolah-olah merupakan sumber gelombang baru. Oleh karena itu, setelah melewati celah sempit gelombang akan merambat membentuk lingkaran-lingkaran dengan celah tersebut sebagai pusatnya.

d. Dispersi Cahaya

Jika cahaya merah atau cahaya monokromatik yang

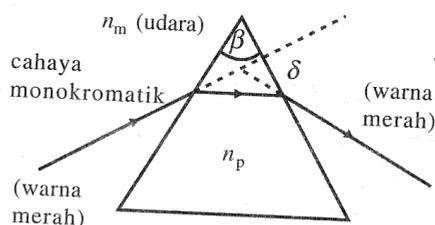
dilewatkan pada sebuah prisma akan menghasilkan cahaya monokromatik yaitu warna merah lagi. Demikian juga jika pada sebuah prisma dilewatkan cahaya monokromatik lainnya, misalnya cahaya biru, pada keluaran prisma akan menghasilkan monokromatik biru.

Sekarang Anda coba lewatkan cahaya polikromatik (cahaya putih) yaitu cahaya yang terdiri atas berbagai macam warna cahaya pada sebuah prisma. Apa yang terjadi? Tentunya Anda akan mendapatkan peristiwa yang berbeda.

Perhatikan gambar berikut.

Gambar 1.34

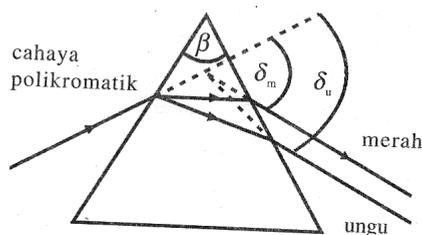
Seberkas cahaya merah (monokromatik) melewati prisma segitiga.



Selain mengalami deviasi atau pembelokan, cahaya polikromatik juga terurai menjadi komponen-komponen warna cahaya. Komponen warna tersebut adalah merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila, dan ungu. Peristiwa penguraian warna cahaya menjadi komponen-komponennya disebut dispersi cahaya.

Gambar 5.35

Seberkas cahaya polikromatik dilensakan pada prisma segitiga.



Ketika melewati prisma, frekuensi gelombang tidak berubah. Besaran yang berubah adalah kecepatan dan panjang gelombang. Alat yang digunakan untuk mengukur panjang gelombang cahaya disebut spektroskop atau spektrometer. Panjang gelombang cahaya akan berbeda untuk setiap warna berbeda. Cahaya warna merah memiliki panjang gelombang terbesar dan cahaya ungu memiliki panjang gelombang terkecil, sedangkan warna-warna lainnya memiliki panjang gelombang di antara kedua nilai tersebut.

Panjang gelombang suatu warna cahaya tertentu terhadap medium yang dilaluinya memiliki persamaan sebagai berikut.

$$\lambda_n = \frac{\lambda_{udara}}{n}$$

dengan λ_n adalah panjang gelombang cahaya ketika melalui medium dengan indeks bias n , sedangkan λ_{udara} adalah panjang gelombang cahaya di udara. Oleh karena $n \geq 1$, panjang gelombang cahaya dalam suatu medium selalu lebih kecil daripada panjang gelombangnya di udara dan untuk $n = 1$, $\lambda_n = \lambda_{udara}$. Jadi, dari persamaan di atas diperoleh panjang gelombang suatu warna cahaya berbanding terbalik dengan indeks bias suatu medium terhadap cahaya tersebut.

Cahaya merah memiliki sudut deviasi terkecil dan cahaya ungu memiliki sudut deviasi terbesar.

Deviasi ungu: $\delta_u = (n_u - 1)\beta$

Deviasi merah: $\delta_m = (n_m - 1)\beta$

Dengan n_u dan n_m adalah indeks bias prisma untuk warna ungu dan merah. Oleh karena indeks bias ungu lebih besar daripada indeks bias merah, pembelokan atau penyimpangan cahaya ungu lebih besar daripada cahaya merah.

Dengan kata lain diperoleh δ_u lebih besar daripada δ_m . Selisih sudut deviasi warna ungu dan sudut deviasi warna merah disebut sudut dispersi (ϕ).

Persamaan sudut dispersi sebagai berikut.

$$\phi = \delta_u - \delta_m$$

dengan:

ϕ = sudut dispersi antara ungu dan merah

δ_u = deviasi ungu

δ_m = deviasi merah

Substitusikan persamaan deviasi ungu dan merah dapat diperoleh sebagai berikut.

$$\varphi = (n_u - 1)\beta - (n_m - 1)\beta$$

$$\varphi = (n_u - n_m)\beta$$

Jika dua prisma segitiga digabungkan dengan menepatkan sudut puncaknya berseberangan, cahaya akan keluar dari prisma tanpa mengalami dispersi. Susunan dua prisma yang tidak mengalami dispersi disebut prisma akromatik.

Susunan prisma akromatik diperoleh jika dispersi oleh prisma (1) sama dengan dispersi prisma (2) sehingga kedua dispersi tersebut saling meniadakan. Secara matematis persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

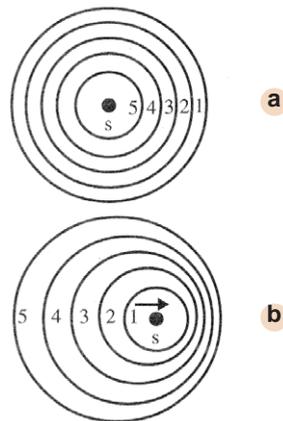
$$(n_{u1} - n_{m1})\beta_1 = (n_{u2} - n_{m2})\beta_2$$

$$\beta_2 = \frac{(n_{u1} - n_{m1})}{(n_{u2} - n_{m2})}\beta_1$$

e. Efek Doppler

Perhatikan gambar berikut ini.

Akan tampak, bentuk gelombang di bagian kanan,



Gambar 1.36

Perambatan gelombang pada permukaan air pada saat

- a. sumber getar tidak bergerak;
- b. sumber getar bergerak ke kanan.

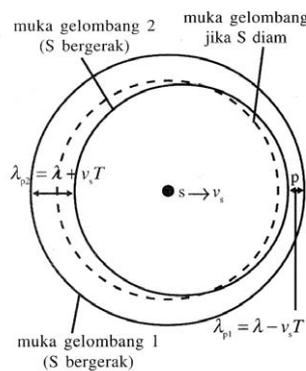
lebih rapat dibandingkan dengan bentuk gelombang di bagian kiri. Hal ini menunjukkan, frekuensi gelombang yang searah dengan arah gerak alat getar menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan frekuensi gelombang yang dijauhi oleh alat getar. Peristiwa perbedaan frekuensi ini disebut dengan **Efek Doppler**.

Fenomena perubahan frekuensi karena pengaruh gerak relatif antara sumber bunyi dan pendengar, untuk pertama kalinya diamati oleh **Christian Doppler (1803-1853)**, seorang ahli fisika berkebangsaan Austria.

Jika sumber bunyi diam terhadap pengamat maka frekuensi yang terdengar oleh pengamat sama dengan frekuensi yang dipancarkan oleh sumber bunyi. Hal ini tidak bergantung pada apakah pengamatnya dekat dengan sumber ataupun cukup jauh, asalkan bunyi tersebut masih dapat terdengar. Jika sumber bunyi atau pengamat bergerak atau kedua-duanya bergerak, pengamat akan mendengar frekuensi yang berbeda dengan yang dipancarkan oleh sumber bunyi. Jika sumber bunyi bergerak mendekati Anda, Anda akan mendengar bunyi yang frekuensinya lebih tinggi. Jika sumber bunyi menjauh maka anda akan mendengar bunyi yang frekuensinya lebih rendah dari frekuensi yang dihasilkan oleh sumber bunyi.

1) Sumber Bunyi Bergerak dan Pengamat Diam

Perhatikan gambar berikut.



Gambar 1.37

Pengamat diam sumber bunyi s dari pengamat dengan kecepatan v_s .

Seorang pengamat (p) berada di sebelah kanan sumber.

Apabila sumber bunyi s tidak bergerak terhadap p , lingkaran puncak gelombang akan simetris berpusat di s . Ketika sumber bunyi s bergerak ke kanan mendekati pengamat p , lingkaran puncak gelombang di kanan menjadi lebih rapat, sedangkan yang di sebelah kiri menjadi lebih renggang.

Perbedaan panjang gelombang yang terbentuk menjadi persamaan berikut ini.

$$\lambda_{p1} = \lambda - v_s T$$

$$\lambda_{p2} = \lambda + v_s T \quad \text{dan} \quad \lambda = \frac{v}{f_s}$$

Jika sumber bunyi memancarkan gelombang bunyi dengan

frekuensi f_s , $v_s T = \frac{v_s}{f_s}$ Oleh karena pengaruh gerak sumber bunyi ke kanan mendekati pengamat p, panjang gelombang yang diterima p adalah

$$\lambda_{p1} = \lambda - v_s T = \frac{v}{f_s} - \frac{v_s}{f_s} = \frac{v - v_s}{f_s}$$

Frekuensi yang didengar oleh pengamat akan menjadi

$$f_p = \frac{v}{\lambda_{p1}} = \frac{v}{\frac{v - v_s}{f_s}} = \frac{v}{v - v_s} f_s$$

Jadi, frekuensi yang didengar pengamat akan menjadi

$$f_p = \frac{v}{v - v_s} f_s$$

Jika sumber bunyi menjauhi pengamat maka persamaan yang akan diperoleh menjadi

$$\lambda_{p2} = \lambda + v_s T = \frac{v}{f_s} + \frac{v_s}{f_s} = \frac{v + v_s}{f_s}$$

Frekuensi yang didengar oleh pengamat akan menjadi

$$f_p = \frac{v}{\lambda_{p2}} = \frac{v}{\frac{v + v_s}{f_s}} = \frac{v}{v + v_s} f_s$$

Jadi, frekuensi yang didengar pengamat akan menjadi

$$f_p = \frac{v}{v + v_s} f_s$$

Secara umum, untuk sumber bunyi bergerak relatif terhadap pengamat yang diam akan berlaku persamaan

$$f_p = \frac{v}{v \pm v_s} f_s$$

dengan:

f_s = frekuensi sumber bunyi

f_p = frekuensi yang didengar oleh pengamat

v = kecepatan bunyi di udara (340 m/s)

v_s = kecepatan sumber bunyi

2) Sumber Bunyi Diam dan Pengamat Bergerak

Jika pengamat p tidak bergerak terhadap sumber bunyi s yang diam, dalam selang waktu t pengamat akan

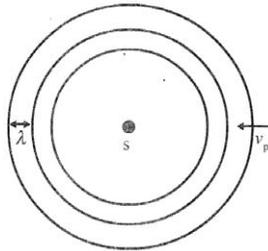
menerima getaran sebanyak $f_s t = \frac{vT}{\lambda}$ dengan v adalah cepat rambat gelombang bunyi dan λ adalah panjang gelombang bunyi. Ketika pengamat p bergerak mendekati sumber bunyi s dengan kecepatan v_p , banyaknya getaran yang diterima oleh pengamat dalam waktu t menjadi lebih banyak sebesar

$$\left(\frac{v}{\lambda} + \frac{v_p}{\lambda} \right) t = \left(\frac{v + v_p}{\lambda} \right) t$$

Frekuensi yang diterima pengamat

$$f_p = \frac{\left(\frac{v + v_p}{\lambda} \right) t}{t} = \frac{v + v_p}{\lambda}$$

Frekuensi yang didengar oleh pengamat adalah



Gambar 1.38

Sumber bunyi s diam pengamat p mendekati sumber bunyi dengan kecepatan v_p .

$$f_p = \frac{v + v_p}{\lambda} = \frac{v + v_p}{v} f_s$$

$$f_p = \frac{v + v_p}{v} f_s$$

Fisikawan Kita



Christian Huygen
(1629-1695)

Nama lengkapnya adalah **Christian Hygens** (1629-1695), Huygen terlahir sebagai seorang pakar matematika, fisika, dan penemu yang menciptakan jam bandul pertama. Dia juga yang menemukan cincin-cincin di sekeliling planet Saturnus. Dalam bukunya yang berjudul "*Traite de la lumie're*", yang diterbitkan pada 1690, ia menolak teori partikel cahaya. Ia menyimpulkan bahwa cahaya bergetar begitu cepat, tentu cahaya itu lebih tepat dikatakan terdiri atas gelombang, bukan partikel. Dalam "*Prinsip Huygens*", ia menunjukkan bahwa setiap titik yang ada pada sebuah gelombang yang dianggap menghasilkan gelombang-gelombang kecil (*wavelets*) yang bergabung bersama untuk membentuk sebuah garis batas gelombang (*wave-front*).

Sumber: Scienceworld.wolfram.com

Persamaan ini berlaku untuk sumber bunyi s diam dan pengamat p mendekati sumber bunyi.

Jika pengamat p bergerak dengan kecepatan v_p menjauhi sumber bunyi s dalam waktu t banyaknya getaran yang diterima pengamat akan menjadi

$$\left(\frac{v - v_p}{\lambda} \right) t$$

Frekuensi yang didengar oleh pengamat akan menjadi

$$f_p = \left(\frac{v - v_p}{v} \right) f_s$$

Secara umum, sumber bunyi diam, tetapi pengamat bergerak terhadap sumber bunyi, frekuensi yang didengar oleh pengamat akan menjadi

$$f_p = \left(\frac{v \pm v_p}{v} \right) f_s$$

3) Sumber Bunyi dan Pengamat Bergerak

- Jika pengamat diam dan sumber bunyi diam, $f_p = f_s$
- Jika salah satu dari pengamat atau sumber bunyi mendekati, $f_p > f_s$.
- Jika salah satu dari pengamat atau sumber bunyi menjauhi, $f_p < f_s$.

Persamaan umum Efek Doppler adalah sebagai berikut.

$$f_p = \left(\frac{v \pm v_p}{v \pm v_s} \right) f_s$$

dengan:

f_p = frekuensi yang didengar oleh pengamat (Hz)

f_s = frekuensi dari sumber bunyi (Hz)

v = kecepatan gelombang bunyi di udara (m/s)

v_s = kecepatan gerak sumber bunyi (m/s)

v_p = kecepatan gerak pengamat (m/s)

Cara menentukan tanda (+) dan tanda (-) yaitu sebagai berikut.

- a) Jika p bergerak mendekati s , $+v_p \rightarrow f_p > f_s$
- b) Jika p bergerak menjauhi s , $-v_p \rightarrow f_p < f_s$
- c) Jika s bergerak mendekati p , $-v_s \rightarrow f_p > f_s$
- d) Jika s bergerak menjauhi s , $+v_p \rightarrow f_p < f_s$
- e) Jika s dan p sama-sama diam, $v_s = 0$ dan $v_p = 0 \rightarrow f_p = f_s$

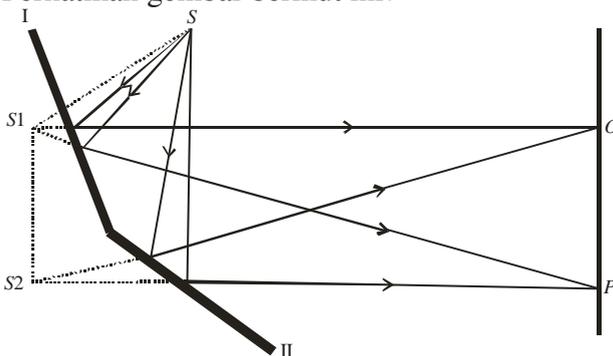
B. Interferensi Cahaya

Ketika Anda mempelajari gelombang pada bab sebelumnya dibahas tentang interferensi gelombang pada tali, gelombang permukaan air, dan gelombang bunyi. Apabila dua gelombang dipadukan menjadi satu akan menghasilkan sebuah gelombang baru. Demikian pula dengan cahaya dalam perambatannya tidak lain adalah sebuah gelombang. Perpaduan dua gelombang cahaya yang dapat menghasilkan sebuah gelombang. Proses perpaduan ini dinamakan interferensi gelombang cahaya.

1. Eksperimen Fresnel dan Young

Agar mendapat dua sumber cahaya yang koheren, Fresnell dan Thomas Young menggunakan sebuah lampu sebagai sumber cahaya.

Perhatikan gambar berikut ini!



Gambar 1.39

Percobaan Cermin Fresnel

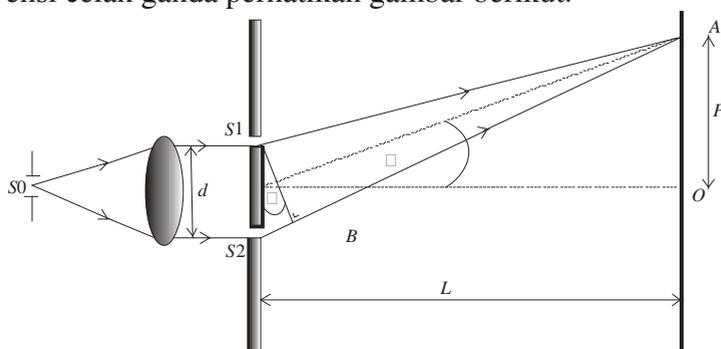
Dengan menggunakan sebuah sumber cahaya S , Fresnell memperoleh dua sumber cahaya S_1 dan S_2 yang koheren dari hasil pemantulan dua cermin. Sinar

monokromatis yang dipancarkan oleh sumber S dipantulkan oleh cermin I dan cermin II yang seolah-olah berfungsi sebagai sumber S_1 dan S_2 . Sebenarnya, S_1 dan S_2 adalah bayangan oleh cermin I dan cermin II.

Berbeda pula apa yang dilakukan dengan Young. Dengan menggunakan dua apenghalang yang satu memiliki satu lubang kecil dan yang kedua dilengkapi dengan dua lubang kecil, Young memperoleh dua sumber cahaya (sekunder) koheren yang monokromatis dari sebuah sumber cahaya monokromatis.

Pola interferensi yang dihasilkan oleh kedua eksperimen tersebut berupa garis-garis terang dan garis-garis gelap pada layar silih berganti. Garis terang terjadi apabila kedua sumber cahaya mengalami interferensi yang saling menguatkan atau interferensi maksimum. Garis gelap terjadi apabila kedua sumber cahaya mengalami interferensi yang saling melemahkan atau interferensi minimum. Yang perlu diketahui kedua sumber cahaya tidak memiliki amplitudo yang sama maka terjadi garis gelap. Sebaliknya, apabila amplitudo tidak sama maka interferensi tetap terjadi hanya minimumnya tidak gelap sama sekali.

Untuk mengetahui terjadinya dua acelah atau interferensi celah ganda perhatikan gambar berikut.



Gambar 1.40

Interferensi Young

Pada gambar di atas tampak bahwa lensa kolimator menghasilkan berkas sejajar. Kemudian, berkas tersebut melewati penghalang yang memiliki celah ganda sehingga S_1 dan S_2 dapat dipandang sebagai dua sumber cahaya monokromatis. Setelah keluar dari S_1 dan S_2 kedua cahaya digambarkan menuju sebuah titik A pada layar. Selisih jarak

yang ditempuh adalah $S_2A - S_1A$ yang disebut dengan beda lintasan.

Jadi, beda lintasan cahaya dapat ditulis sebagai berikut.

$$\Delta S = S_2A - S_1A$$

Apabila jarak S_1A dan S_2A sangat besar dibandingkan jarak S_1 ke S_2 ($d = S_1S_2$) maka sinar S_1A dan S_2A dapat dianggap sejajar dan selisih jaraknya $\Delta S = S_2B$.

Coba Anda perhatikan segitiga S_1S_2B .

$$S_2A = S_1S_2 \sin \theta = d \sin \theta$$

d adalah jarak antara kedua celah.

Perhatikan pula segitiga COA

$$\sin \theta = \frac{p}{CA}$$

Untuk sudut-sudut kecil akan diperoleh:

$$\sin \theta \approx \tan \theta \approx \frac{p}{l}$$

Untuk θ kecil berarti $\frac{p}{l}$ atau $p = l$ sehingga selisih lintasan yang ditempuh oleh cahaya dari sumber S_1 dan sumber S_2 akan menjadi:

$$\Delta S = S_2B = d \sin \theta = d \tan \theta ; \text{ dengan } \tan \theta = \frac{p}{l}$$

sehingga
$$\Delta S = \frac{dp}{l}$$

Intrefrensi maksimum akan terjadi apabila kedua gelombang yang tiba di titik A sefase atau memiliki fase sama. Dua gelombang memiliki fase sama apabila beda lintasannya adalah kelipatan bilangan cacah panjang gelombang.

$$\Delta S = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$$

$$\Delta S = m\lambda$$

Persamaan interferensi maksimum menjadi

$$\frac{dp}{l} = m\lambda$$

dengan:

d = jarak antara celah pada layar

p = jarak titik pusat interferensi (o) ke garis terang di A

l = jarak celah ke layar

λ = panjang gelombang cahaya

m = orde interferensi (0, 1, 2, 3, ...)

Di titik O selalu terjadi interferensi maksimum (garis terang) sehingga disebut terang pusat atau terang orde nol dengan syarat berkas yang datang berkas sejajar dan tegak lurus pada bidang celah sehingga S_1 dan S_2 merupakan sumber sefasa.

Contoh Soal 1.6

Cahaya monokromatik dengan panjang gelombang 6000 \AA melewati celah ganda yang berjarak 2 mm. Jika jarak celah ke layar adalah 2 meter, tentukanlah jarak terang pusat dengan garis terang orde ketiga pada layar.

Jawaban:

Diketahui:

$$d = 2 \text{ mm}$$

$$l = 1 \text{ m} = 10^3 \text{ mm}$$

$$\lambda = 6000 \text{ \AA} = 6000 \times 10^{-10} \text{ m} = 6 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$m = 3$$

$$\frac{dp}{l} = m\lambda \rightarrow \frac{p(2)}{10^3} = 3(6 \times 10^{-7}) \rightarrow p = \frac{(18 \times 10^{-7}) \cdot 10^3}{2}$$

$$= \frac{1,8}{2} = 0,9 \text{ mm}$$

Jadi, jarak garis terang pusat ke garis terang orde ketiga adalah 0,9 mm.

Pada layar akan terjadi interferensi minimum atau garis-garis gelap apabila kedua gelombang cahaya S_1 dan S_2 yang sampai pada layar berlawanan fase, yaitu berbeda sudut fase 180° . Untuk mendapatkan beda fase sebesar 180° , beda lintasan kedua gelombang merupakan kelipatan bilangan ganjil dari setengah gelombang, yaitu:

$$\Delta S = \frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \dots$$

$$\Delta S = (2m-1)\frac{1}{2}\lambda$$

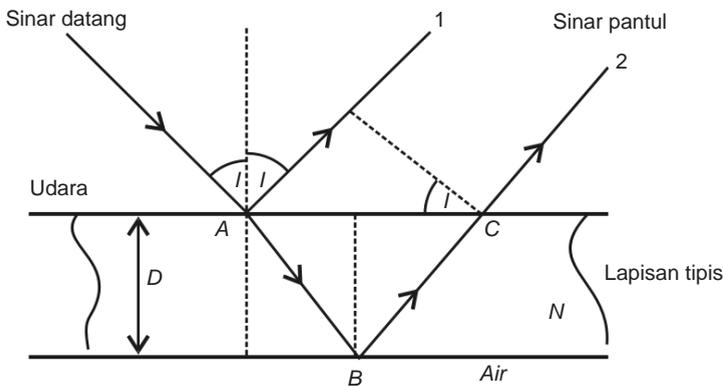
dengan $m = 1, 2, 3, \dots$

Dengan memasukkan persamaan $\Delta S = \frac{dp}{l}$ akan diperoleh bahwa persamaan interferensi minimum memenuhi persamaan berikut ini .

$$\frac{dp}{l} = (2m-1)\frac{1}{2}\lambda$$

2. Interferensi Lapisan Tipis

Coba Anda amati pemantulan cahaya Matahari oleh lapisan di atas permukaan air. Dengan pengamatan yang lebih teliti maka akan terlihat garis-garis berwarna pada lapisan minyak itu. Spektrum warna ini menunjukkan adanya peristiwa interferensi oleh lapisan minyak yang tipis tersebut. Cahaya yang terpantul oleh lapisan minyak dapat mengalami interferensi maksimum atau minimum.



Gambar 1.41

Pemantulan oleh lapisan atas dan lapisan bawah dapat menimbulkan interferensi.

Selisih lintasan yang ditempuh oleh sinar datang hingga menjadi sinar pantul ke-1 dan sinar pantul ke-2 adalah

$$\Delta S = S_2 - S_1$$

$$\Delta S = n(AB + BC) - AD = n(2AB) - AD$$

dengan n adalah indeks bias lapisan tipis.

Apabila tebal lapisan adalah d maka $d = AB \cos r$

sehingga $AB = \frac{d}{\cos r}$ dan dimana

Sehingga

$$\Delta S = 2n \left(\frac{d}{\cos r} \right) - (2d \tan r) \sin i$$

$$\Delta S = \frac{2nd}{\cos r} - \frac{2d \sin r \cdot \sin i}{\cos r}$$

Dengan menggunakan hukum snellius, sehingga selisih jarak tempuh kedua sinar menjadi

$$\Delta S = \frac{2nd}{\cos r} - \frac{2d \sin r \cdot \sin^2 i}{\cos r}$$

$$\Delta S = \frac{2nd}{\cos r} (1 - \sin^2 r) = \frac{2nd}{\cos r} (\cos^2 r)$$

$$\Delta S = 2nd \cos r$$

Agar terjadi interferensi maksimum di titik P maka ΔS harus merupakan kelipatan dari panjang gelombang (λ). Akan tetapi, karena sinar pantul di B mengalami perubahan

fase $\frac{1}{2}$ maka ΔS akan menjadi

$$\Delta S = \left(m - \frac{1}{2} \right) \lambda = (2m - 1) \frac{1}{2} \lambda$$

Interferensi maksimum sinar pantul pada lapisan tipis akan memenuhi persamaan:

$$2nd \cos r = (2m + 1) \frac{1}{2} \lambda$$

Persamaan di atas ini berlaku untuk indeks bias (n) lapisan tipis lebih besar dari 1 atau > 1 .

Contoh Soal 1.7

Tentukan tebal lapisan minimum yang diperlukan agar terjadi interferensi maksimum pada sebuah lapisan tipis yang memiliki indeks bias $\frac{1}{3}$ dengan memakai panjang gelombang 7000 \AA .

Jawaban:

Persamaan interferensi maksimum adalah

$$2nd \cos r = (2m+1) \frac{\lambda}{2} \Rightarrow d = \frac{(2m+1) \frac{\lambda}{2}}{2n \cos r}$$

Agar tebal lapisan minimum maka $m = 1$ dan $\cos r$ terbesar atau $\cos r = 1$ sehingga akan diperoleh:

$$d = \frac{(2m+1) \frac{\lambda}{2}}{2n \cos r} = \frac{\frac{3}{2} \lambda}{\frac{2}{3}} = \frac{9}{4} \lambda$$

$$d = \frac{9}{4} \times 7000 \text{ \AA} = 15750 \text{ \AA} = 1,575 \text{ \mu m}$$

Adapun untuk memperoleh interferensi minimum kedua sinar pantul

harus memiliki beda fase $\frac{1}{2}$. Maka,

$$\Delta S = \left(1 + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right) \lambda, \left(2 + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right) \lambda, \left(3 + \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right) \lambda, \dots$$

$$\Delta S = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots = m\lambda$$

Interferensi minimum dalam arah pantaul akan memenuhi persamaan $\Delta S = 2nd \cos r$ dan $\Delta S = m\lambda$ atau $2nd \cos r = m\lambda$

Apabila memenuhi syarat $2nd \cos r = m\lambda$ atau $n_1 > n_2 < n_3$

C. Difraksi Cahaya

Apabila seberkas cahaya monokromatis dilewatkan pada kisi maka pola difraksi yang dihasilkan pada layar berupa garis terang dan garis gelap yang silih berganti. Pola difraksi yang dihasilkan oleh kisi jauh lebih tajam dibandingkan pola interferensi celah tunggal ganda yang ditunjukkan oleh Young. Makin banyak celah pada sebuah kisi yang memiliki lebar sama, makin tajam pola difraksi yang dihasilkan pada layar.

1. Difraksi Maksimum

Pada layar akan tampak garis-garis terang atau interferensi maksimum apabila beda lintasan yang dilewati oleh cahaya yang datang dari dua celah yang berdekatan $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$ atau bilangan cacah kali panjang gelombang.

Beda lintasannya

Dengan demikian pola difraksi maksimum utama pada kisi menjadi

dengan $m =$ orde dari difraksi dan d adalah jarak antarcelah atau tetapan kisi.

2. Difraksi Minimum

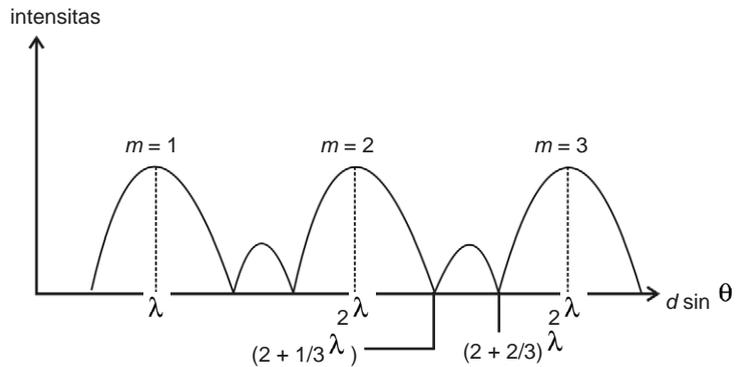
Minimum pertama sesudah maksimum utama terjadi apabila

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{N} \right) \lambda$$

dengan $N =$ banyaknya celah kisi yang digunakan. Berikutnya

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{2}{N} \right) \lambda$$

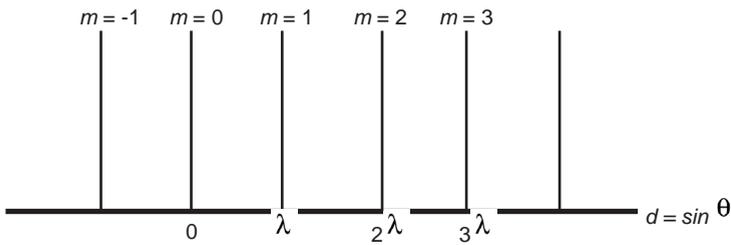
Misalnya, untuk $N = 3$ celah diperoleh



Gambar 1.42
Difraksi Minimum

Titik A diartikan minimum. Pada minimum ini terdapat maksimum kecil yang disebut maksimum sekunder.

Contoh berikut, untuk N banyak celah diperoleh



Perlu Anda ketahui maksimum sekunder yang sangat banyak di antara maksimum utama, intensitasnya sangat kecil dan tidak teramati.

Apabila difraksi digunakan cahaya putih atau cahaya monokromatik maka pada layar akan tampak spektrum warna dengan terang pusat berupa warna putih.

Cahaya merah dengan panjang gelombang terbesar mengalami lenturan atau pembelokan paling besar, cahaya ungu mengalami lenturan terkecil karena panjang gelombang cahaya ungu kecil. Setiap orde difraksi menunjukkan spektrum warna.

Contoh Soal 1.8

Sebuah kisi dengan 20.000 garis/cm. Pada kisi dilewatkan cahaya tegak lurus dengan panjang gelombang λ . Garis terang difraksi (maksimum utama) orde pertama membentuk sudut 60° terhadap garis normal. Tentukan berapa panjang gelombangnya!

Jawab:

$$d \sin \theta = m \lambda$$

$$d = \frac{1}{20.000} \text{ cm} = 5 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

Gunakan persamaan

$$\sin 60^\circ = \frac{1}{2} \sqrt{3}, \quad m = 1$$

sehingga diperoleh

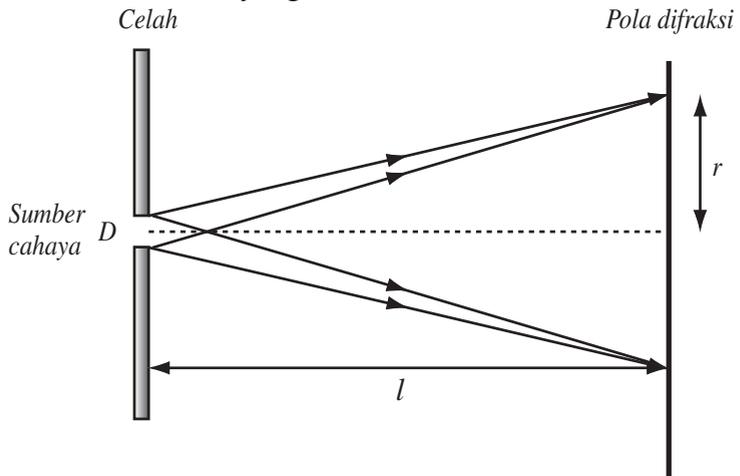
$$5 \times 10^{-5} \text{ cm} \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} \right) = (1) \lambda \Rightarrow \lambda = 0,433 \times 10^{-4} \text{ cm} = 4330 \text{ \AA}$$

Jadi, panjang gelombang yang digunakan adalah 4330 \AA .

D. Daya Urai Optik

Apa yang dimaksud dengan daya urai optik? Anda mungkin pernah melihat alat-alat optik seperti teropong, lup, dan mikroskop memiliki kemampuan untuk memperbesar bayangan benda. Akan tetapi, perbesaran yang dihasilkan sangat terbatas. Apa yang membuat perbesarannya terbatas? Karena kemampuan perbesaran alat-alat optik itu selain selalu dibatasi oleh daya urai lensa juga oleh pola difraksi yang terbenteng pada bayangn benda itu.

Pola difraksi yang terbentuk oleh sebuah celah atau



Gambar 1.43

Daya urai suatu lensa

lubang yang bulat terdiri dari bintik-bintik terang pusat yang dikelilingi terang dan gelap. Betrikut adalah gambar

dari uraian pola tersebut.

Keterangan Gambar:

D = diameter lubang (celah)

l = jarak celah ke layar

r = daya urai dari celah lingkaran

= sudut urai dari celah

Jari-jari lingkaran terang (r) yang terbentuk dapat diartikan sebagai daya pisah pola difraksi yang terbatas.

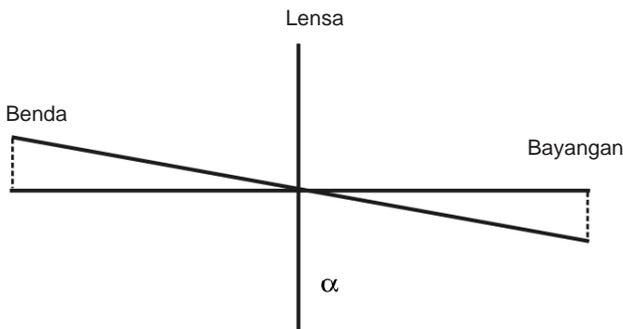
Daya urai dari celah lingkaran dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut.

$$r = 1,22 \frac{\lambda l}{D}$$

dengan λ adalah panjang gelombang cahaya yang dipergunakan. Untuk sudut kecil tangen suatu sudut sama dengan sinus sudutnya. Dari gambar di atas diperoleh

$$\sin\theta \approx \tan\theta = \frac{r}{T}$$

sehingga persamaan $r = 1,22 \frac{\lambda l}{D}$ dapat ditulis menjadi
Coba Anda perhatikan gambar berikut.



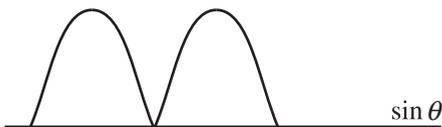
Gambar 1.44

Daya urai suatu lensa.

$$r = 1,22 \frac{\lambda l}{D} \rightarrow \frac{r}{T} = 1,22 \frac{\lambda l}{D}$$

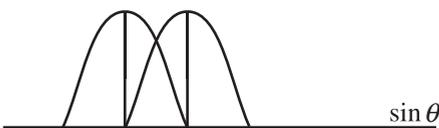
Kedua bayangan jelas terlihat terpisah karena maksimum utama pola difraksinya terpisah. Suut terkecil agar kedua bayangan benda masih dapat terlihat terpisah disebut sudut resolusi atau sudut pisah.

Perhatikan gambar berikut.



Menurut kriteria Reighley jarak antara kedua maksimum tersebut paling kecil sama dengan jejari lingkaran terang. Jadi, maksimum yang kedua jatuh pada minimum yang pertama atau Jarak sudut antara kedua pusat.

Perhatikan gambar berikut.



Gambar 1.45

Dua sumber cahaya yang tampak berpisah karena masih dalam sudut pisah atau sudut resolusi.

Gambar 1.46

Batas dua sumber cahaya mulai tampak menyatu, karena memiliki sudut lebih kecil dari sudut resolusi.

Contoh Soal 1.9

Tentukan daya urai darisebuah celah dengan diameter 1 mm, jarak celah ke layar 2 m yang menggunakan cahaya dengan panjang gelombang 580 nm.

Jawab:

Diketahui:

$$d = 2 \text{ mm}$$

$$l = 4 \text{ m} = \text{mm}$$

$$\lambda = \text{mm}$$

$$r = 1,22 \frac{\lambda l}{D}$$

$$r = 1,22 \frac{(5,8 \times 10^{-4})(2 \times 10^3)}{1} = 1,4 \text{ mm}$$

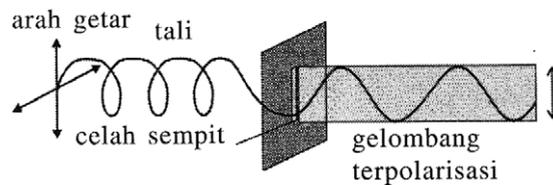
Gunakan persamaan

Jadi, daya urai dari celah di atas adalah 1,4 mm.

E. Polarisasi Cahaya

Anda sebelumnya pernah mempelajari apa itu interferensi dan difraksi. Kedua peristiwa ini dapat terjadi pada semua jenis gelombang. Juga kedua peristiwa ini dapat terjadi pada gelombang transversal dan longitudinal. Gelombang yang dapat mengalami gejala polarisasi hanyalah gelombang transversal saja. Sebab gelombang transversal adalah gelombang yang arah getarnya tegak lurus arah perambatannya.

Coba Anda perhatikan gambar berikut ini.

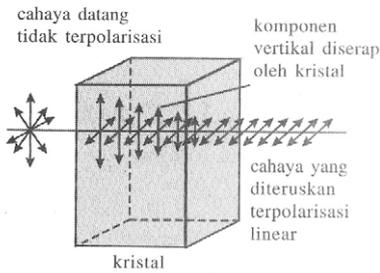


Gambar 6.47

Gelombang tali yang terpolarisasi

Sebelum dilewatkan pada celah yang sempit vertikal tali menyimpang seperti spiral. Kemudian, setelah tali melewati celah dan hanya arah getar vertikal saja yang masih tersisa, sedangkan arah getar horizontal tali diredam atau diserap oleh celah yang sempit tersebut. Gelombang yang keluar dari celah yang sempit tersebut disebut gelombang terpolarisasi.

Maksud dari terpolarisasi adalah arah getar tersebut memiliki satu arah getar tertentu saja. Polarisasi yang terjadi pada satu arah saja disebut polarisasi linear.



Gambar 1.49

Polarisasi Linear

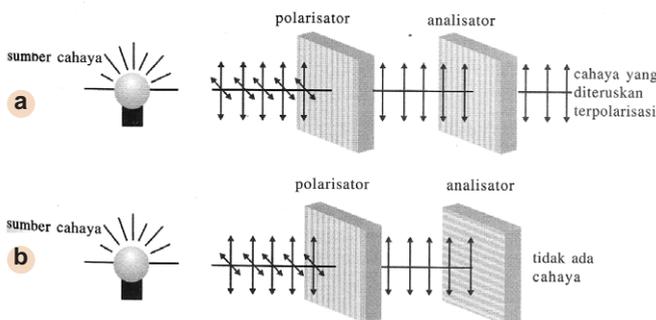
Cahaya merupakan gelombang transversal dengan medan listrik E dan medan magnet B . Arah kecepatan perambatannya tegak lurus terhadap bidang yang dibentuk oleh arah getar E dan B . Arah polarisasi gelombang cahaya didefinisikan sebagai arah getar E bukan getar B . Misalkan, pada gelombang cahaya oleh lampu pijar, arah getar E adalah ke segala arah.

1. Polarisasi pada Kristal

Cahaya alamiah (tidak terpolarisasi) apabila dilewatkan pada sebuah kristal maka arah getar cahaya yang keluar dari kristal hanya dalam satu arah saja sehingga disebut cahaya terpolarisasi linear.

Perhatikan gambar berikut ini!

Gambar di atas menunjukkan susunan dua kening



Gambar 1.50

- (a) Polarisator dan analisisator dipasang sejajar.
- (b) Polarisator dan analisisator dipasang bersilangan.

polaroid. Keping polaroid yang pertama disebut polarisator, sedangkan keping polaroid yang kedua disebut analisisator.

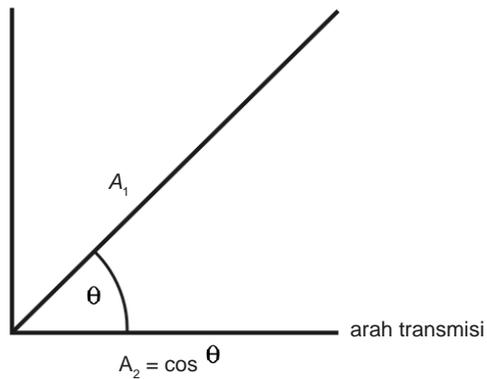
Ada arah getar tertentu yang dapat diteruskan oleh keping poalroid, sedangkan arah yang tegak lurus tidak diteruskan. Arah getar yang dapat diteruskan disebut arah polarisasinya.

Pada gambar (a) arah transmisi polarisator dan analisator sejajar dan gambar (b) arah transmisi analosator tegak lurus terhadap arah transmisi polarisator sehingga tidak ada getaran yang datang ke analisator yang dapat diteruskan.

Apabila seberkas cahaya alamiah dengan intensitas I_0 dilewatkan pada sebuah polarisator iedeal, intensitas cahaya yang dilewatkan adalah 50% atau $1/2I_0$. Akan tetapi, apabila keduanya dipasang bersilang tidak ada intensitas cahaya yang lewat analisator.

Apabila arah polarisasi analisator membuat sudut terhadap arah transmisi polariastor maka komponen arah getar cahaya terpolarisasi linear.

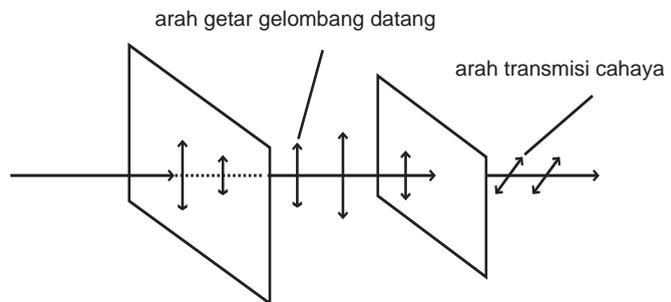
Perhatikan gambar berikut ini.



Gambar1.51

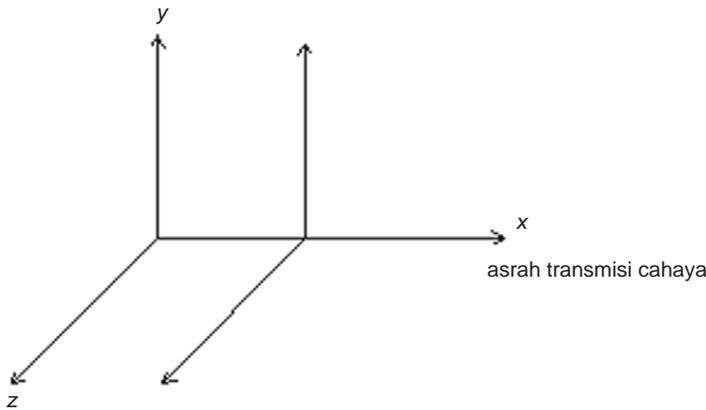
Analisor yang membentuk sudut terhadap arah transmisi gelombang.

$$I_2 : A_2^2 = A_1^2 \cos^2 \theta = I_1 \cos^2 \theta$$



Gambar 1.52

Polarisator dan analisator membentuk sudut θ .



Gambar 1.53

Arah polarisator dalam sumbu cartesian.

Misalkan arah polarisasi, polarisator searah sumbu- y maka gelombang yang telah melewatinya memiliki getaran searah sumbu y . Jika arah polarisasi analisator jatuh searah sumbu y maka dikatakan polarisator dan analisator dipasang sejajar dan seluruh cahaya yang dilewatkan polarisator juga dilewatkan oleh analisator. Apabila arah polarisasi analisator searah sumbu z , artinya sudut antara arah polarisasi polarisator dan analisator sebesar 90° maka dikatakan polarisator dan analisator dipasang bersilang dan tidak ada cahaya yang diteruskan analisator.

Secara umum persamaan yang diperoleh dari percobaan di atas adalah

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 \quad \text{dan} \quad I_2 = I_1 \cos^2 \theta$$

sehingga
$$I_2 = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \theta$$

I_2 adalah intensitas cahaya yang lewat analisator dan adalah sudut antara arah polarisasi polarisator dan arah polarisasi analisator. Apabila keduanya sejajar $= 0$ dan apabila keduanya saling bersilangan $= 90^\circ$. Intensitas cahaya bersatuan watt/m^2 .

Contoh Soal 1.10

Seberkas cahaya alamiah dilewatkan pada dua keping kaca polaroid yang arah polarisasi satu sama lain membentuk sudut 30° . Jika intensitas cahaya alamiahnya adalah 150 watt/m^2 , tentukan intensitas cahaya yang telah melwati kedua kaca polaroid tersebut!

Jawaban:

Gunakan persamaan

$$I_2 = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \theta = \frac{1}{2} (100) (\cos 30^\circ)^2$$

$$I_2 = (50) \left(\frac{1}{2} \sqrt{3} \right)^2 = \frac{150}{4} = 37,5 \text{ watt/cm}^2$$

Jadi, intensitas cahaya yang dileatkan adalah 37,5 watt/cm².

2. Polarisasi pada Pemantulan dan Pembiasan

Seberkas cahaya alami di jatuhkan pada permukaan bidang batas dua acermir medium. Sebagian cahaya akan mengalami pembiasan dan sebagian lagi mengalami pemantulan. Sinar bias dan sinar pantul akan terpolarisasi sebagian. Apabila sinar datang diubah-ubah, pada suatu saat sinar bias dan sinar pantul membentuk sudut 90°. Pada keadaan ini, sudut sinar datang (i) disebut sudut polarisasi (i_p) karena sinar yang terpantul mengalami polarisasi sempurna (polarisasi linear).

Menurut Hukum Snellius

$$n_1 \sin i_p = n_2 \sin r, \text{ dengan } r + i_p = 90 \text{ atau } r = 90 - i_p$$

sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut.

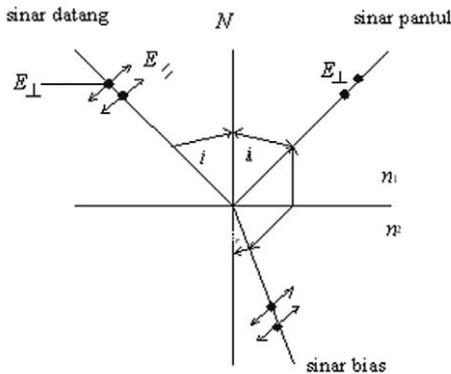
$$n_1 \sin i_p = n_2 \sin (90 - i_p)$$

$$n_1 \sin i_p = n_2 \cos i_p \rightarrow \frac{\sin i_p}{\cos i_p} = \frac{n_2}{n_1} \text{ atau } \tan i_p = \frac{n_2}{n_1}$$

Sudut i_p disebut sudut polarisasi atau sudut Brewster yaitu pada saat sinar bias dan sinar pantul membentuk sudut 90°.

Getaran pada sinar datang dapat diuraikan menjadi dua komponen yaitu

- Sejajar bidang datang E sejajar;
- Tegak lurus pada bidang datang E tegak lurus yang digambarkan dengan titik hitam.



Gambar 1.54

Sinar pantul terpolarisasi linear, sedangkan sinar bias mengalami polarisasi.

Pada $i = i_p$ (sinar pantul tegak lurus sinar bias) komponen E (sejajar) tidak terdapat pada sinar pantul sebab searah sinar pantul. Komponen E (tegak lurus) seluruhnya dibiaskan bersama sebagian dari E (tegak lurus) sehingga

- sinar pantul mengalami polarisasi linier;
- sinar bias mengalami polarisasi sebagian.

Contoh Soal 1.11

Seberkas sinar datang pada permukaan zat cair yang memiliki indeks bias. Apabila indeks bias udara adalah 1, tentukan besarnya sudut polarisasi.

Jawaban:

Gunakan persamaan

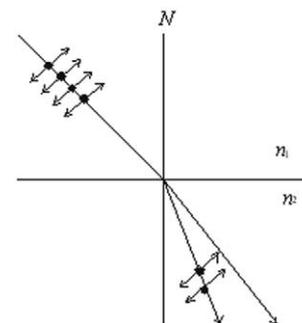
$$\tan i_p = \frac{n_2}{n_1} = \frac{4}{3} \Rightarrow i_p = 53^\circ$$

Jadi, sudut polarisasi adalah 53° .

3. Polarisasi Pembiasan Ganda

Dalam sebuah kristal tertentu cahaya alamiah yang masuk ke dalam kristal dapat mengalami pembiasan ganda. Pembiasan ganda ini dapat terjadi karena kristal tersebut memiliki dua nilai indeks bias.

Dari gambar di atas tampak ada dua bagian sinar yang dibiaskan yang satu mengandung E (sejajar) dan yang lain hanya mengandung E (tegak lurus). Jadi, indeks bias juga laju E (sejajar) dan E (tegak lurus) tidak sama.



Gambar 1.55

Polarisasi pada pembiasan ganda.

4. Polarisasi dengan Hamburan

Seberkas cahaya yang melewati gas akan mengalami polarisasi sebagian. Karena partikel-partikel gas dapat menyerap dan memancarkan kembali cahaya yang mengenainya. Penyerapan dan pemancaran cahaya oleh partikel-partikel gas disebut hamburan. Oleh karena peristiwa hamburan ini maka langit pada siang hari tampak berwarna biru. Karena partikel-partikel udara menyerap sinar Matahari dan memancarkan kembali (terutama) cahaya biru. Demikian pula, pada pagi hari dan sore hari partikel-partikel udara akan menghamburkan lebih banyak cahaya biru (melalui kolom udara yang lebih panjang) sehingga yang tersisa dari cahaya Matahari adalah cahaya merahnya.

Bulan tidak memiliki atmosfer sehingga tidak ada yang dapat menghamburkan cahaya Matahari. Oleh karena itu, atmosfer Bulan akan tampak gelap.

F. Gelombang Bunyi

Pernahkah Anda memetik gitar? Apakah yang Anda rasakan? Apakah Anda merasakan perbedaan nada dari keenam nada tersebut? Coba bagaimanakah Anda dapat menjelaskan perbedaan ini?

Apakah Anda masih ingat ketika Anda mempelajari pembahasan mengenai gerak gelombang. Gelombang adalah getaran yang merambat. Dalam pembahasan bab ini, Anda akan mempelajari bunyi sebagai gelombang.

Bunyi yang Anda dengar sangat beragam, baik bunyi yang enak didengar maupun bunyi yang bising. Perlu Anda ketahui bahwa bunyi adalah gelombang longitudinal yang memerlukan medium dalam perambatannya.

1. Kecepatan Perambatan Gelombang Bunyi

Apakah Anda masih ingat, bagaimanakah gelombang bunyi merambat? Gelombang bunyi merambat melalui medium seperti gas, cair, ataupun padat. Tanpa adanya medium, Anda tidak dapat mendengar bunyi yang ditimbulkan oleh benda yang sedang bergerak.



Gambar 1.56

Petikan gitar menghasilkan gelombang bunyi.

Biasanya Anda mendengar bunyi atau suara yang merambat di udara. Bagaimanakah bunyi atau suara ketika merambat di dalam air? Coba Anda praktikkan di sebuah kolam renang dekat rumah atau sekolah Anda. Jika Anda sedang menyelam dalam sebuah kolam, kemudian teman Anda berteriak dari pinggir kolam, tentu saja Anda dapat mendengar teriakan teman Anda tersebut. Demikian juga ketika teman Anda tersebut sedang menyelam dan memukul dua buah batu yang ada di tangannya, tentunya Anda dapat mendengarkan dengan jelas gelombang bunyi yang ditimbulkan oleh pukulan batu tersebut.

a. Kecepatan Perambatan Bunyi di Udara

Anda telah mengetahui, gelombang bunyi memerlukan zat perantara seperti udara. Untuk mengetahui kecepatan perambatan gelombang bunyi di udara, Anda dapat melakukan kegiatan berikut ini.

Eksperimen 1.2

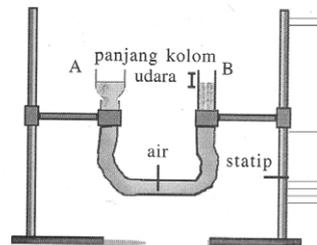
Menentukan kecepatan perambatan gelombang bunyi di udara.

Coba Anda sediakan dua buah pipa, sebuah selang plastik elastis, air secukupnya, dan sebuah garputala yang telah diketahui frekuensinya serta sebuah mistar. Kemudian, coba Anda susun peralatan percobaan tersebut seperti yang terlihat dalam gambar berikut.

Coba kamu hubungkan pipa A dan pipa B dengan sebuah selang plastik yang telah disiapkan. Kemudian, coba tuangkan air ke dalam pipa A sehingga air akan mengisi sebagian besar pipa-pipa tersebut. Ternyata, sebagian pipa ada yang kosong. Bagian pipa B yang kosong disebut sebagai panjang kolom udara. Untuk mengubah panjang kolom udara tersebut caranya adalah dengan menggeser, menaikkan, atau menurunkan posisi pipa A. Jika pipa A dinaikkan, panjang kolom udara pada pipa B akan berkurang karena sebagian air mengalir ke pipa B. Akan tetapi, apabila pipa A diturunkan, panjang kolom udara pada pipa B akan bertambah.

Langkah-Langkah Kegiatan:

1. Coba Anda atur kolom udara pada pipa B sependek mungkin, lalu getarkan garputala di atasnya.
2. Turunkan pipa A secara perlahan-lahan sehingga panjang kolom udara pada pipa B bertambah sambil mendengarkan

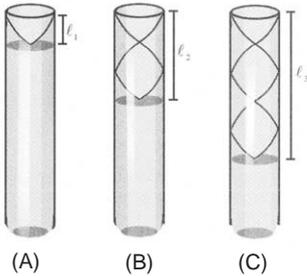


Gambar 1.57

saat terjadinya bunyi kuat yang dihasilkan oleh kolom udara pada pipa B.

- Ukur panjang kolom udara pada pipa B, pada saat Anda mendengar bunyi kuat pertama. Coba Anda hasilnya dalam tabel (panjang kolom udara = l_1)

Jumlah Pengukuran	l_1	l_2	l_3
1
2
3
4
5



Gambar 1.58

- Getarkan garputala kembali dan turunkan pipa A secara perlahan-lahan sehingga kolom udara pada pipa B bertambah panjang. Coba dengarkan kembali saat terjadinya bunyi kuat yang kedua.
- Ukur dan catat panjang kolom udara pada pipa B pada saat terjadinya bunyi kuat kedua (panjang kolom udara = l_2).
- Coba ulangi langkah 4 sampai Anda mendengarkan bunyi keras berikutnya, yaitu bunyi kuat ke tiga.
- Ukur dan catat panjang kolom udara pada pipa B, pada saat terjadinya bunyi kuat ke tiga (panjang kolom udara =

Agar memperoleh hasil pengukuran yang lebih teliti, coba ulangi langkah-langkah percobaan tersebut sehingga untuk panjang kolom udara (l_1 , l_2 , dan l_3) didapatkan masing-masing lima hasil pengukuran.

$$l_1 = \frac{1}{4} \lambda \quad \lambda = 4l_1$$

$$l_2 = \frac{3}{4} \lambda \quad \lambda = \frac{4}{3}l_2$$

$$l_3 = \frac{5}{4} \lambda \quad \lambda = \frac{4}{5}l_3$$

Nilai rata-rata:

$$\bar{l}_1 = \frac{\sum l_1}{n}$$

$$\bar{l}_2 = \frac{\sum l_2}{n}$$

$$\bar{l}_3 = \frac{\bar{\lambda}_3}{n}$$

Dari hasil pengukuran panjang kolom udara pada kegiatan di atas, Anda dapat memperoleh nilai panjang gelombang bunyi dalam kolom udara. Dari \bar{l}_1 diperoleh $\bar{\lambda}_1$, dari \bar{l}_2 diperoleh $\bar{\lambda}_2$, dan dari \bar{l}_3 diperoleh $\bar{\lambda}_3$. Kemudian, dari masing-masing nilai panjang gelombang bunyi dalam kolom udara tersebut Anda memperoleh masing-masing kecepatan \bar{v}_1 , \bar{v}_2 , dan \bar{v}_3 .

$$l_1 = \frac{1}{4} \lambda \Rightarrow \lambda = 4l_1 \quad \text{dan} \quad \bar{v}_1 = f\bar{\lambda}_1$$

$$l_2 = \frac{3}{4} \lambda \Rightarrow \lambda = \frac{4}{3}l_2 \quad \text{dan} \quad \bar{v}_2 = f\bar{\lambda}_2$$

$$l_3 = \frac{5}{4} \lambda \Rightarrow \lambda = \frac{4}{5}l_3 \quad \text{dan} \quad \bar{v}_3 = f\bar{\lambda}_3$$

Nilai kecepatan rata-ratanya yaitu \bar{v}_1 , \bar{v}_2 , dan \bar{v}_3 , Anda akan memperoleh sebuah nilai kecepatan rata-rata \bar{v} , yaitu sebagai berikut.

$$\bar{v} = \frac{\bar{v}_1 + \bar{v}_2 + \bar{v}_3}{3}$$

Oleh karena nilai frekuensi f dari garputala diketahui, juga \bar{l}_1 , \bar{l}_2 , dan \bar{l}_3 (diperoleh dari hasil pengukuran), kecepatan rata-rata gelombang bunyi di udara pada saat percobaan dapat ditentukan. Kolom udara yang digunakan untuk menentukan kecepatan gelombang di udara ini disebut tabung resonator,

Contoh Soal 1.12

Dari percobaan dengan menggunakan tabung resonator maka diperoleh bunyi kuat pertama, kedua, dan ketiga dengan panjang gelombang kolom udaranya masing-masing 9 cm, 24,5 cm, dan 40 cm. Jika frekuensi garputala yang digunakan 2.050 Hz, tentukan nilai \bar{v}_1 , \bar{v}_2 , dan \bar{v}_3 dari masing-masing panjang kolom udara.

Penyelesaian:

$$l_1 = 9 \text{ cm} \otimes l_1 = 4l_1 = 4(0,09 \text{ m}) = 0,36 \text{ m}$$

$$l_2 = 24,5 \text{ cm} \otimes l_2 = \frac{4}{3}l_2 = \frac{4}{3}(0,245 \text{ m}) = 0,326 \text{ m}$$

$$l_3 = 40 \text{ cm} \otimes l_3 = 4l_3 = \frac{4}{5}(0,4 \text{ m}) = 0,32 \text{ m}$$

Maka, panjang gelombangnya adalah sebagai berikut.

$$v_1 = f\lambda_1 = (2.050 \text{ Hz})(0,36 \text{ m}) = 738 \text{ ms}^{-1}$$

$$v_2 = f\lambda_2 = (2.050 \text{ Hz})(0,326 \text{ m}) = 668,3 \text{ ms}^{-1}$$

$$v_3 = f\lambda_3 = (2.050 \text{ Hz})(0,32 \text{ m}) = 656 \text{ ms}^{-1}$$

Dari hasil percobaan dengan menggunakan tabung kolom udara akan diperoleh selisih antara l_2 dan l_1 , serta l_3 dan l_2 yang hasilnya sama dengan setengah panjang gelombang.

$$l_2 - l_1 = l_3 - l_2 = \frac{1}{2}l$$

Jadi, bunyi keras berurutan akan terdengar jika perbedaan

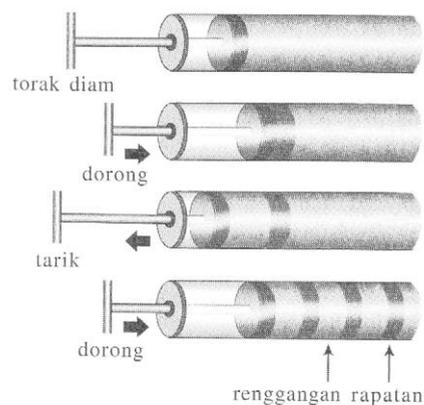
$$\Delta l = \frac{1}{2}\lambda$$

panjang tabung udaranya

a. Kecepatan Perambatan Bunyi dalam Zat Cair, Zat Gas, dan Zat Padat

Coba kamu perhatikan gambar berikut.

Dari gambar tersebut tampak pada saat torak ditekan,



Gambar 1.59

Gelombang bunyi berbentuk rapatan dan renggangan.

tekanan akan diteruskan ke zat cair sehingga akan timbul rapatan. Jika torak ditarik di dalam tabung akan terbentuk regangan. Seterusnya, jika dilakukan penarikan dan peneanan secara periodic pada zat cair akan terbentuk rapatan-rapatan dan regangan-regangan yang merambat ke kanan. Getaran dari rapatan dan regangan ini merupakan proses perambatan gelombang longitudinal di dalam zat cair.

Kecepatan perambatan gelombang bunyi dalam zat cair ini bergantung pada interaksi antara molekul dan sifat inersia medium. Interaksi antara molekul-molekul zat cair dinyatakan dengan *modulus bulk* (B). Modulus Bulk (B) didefinisikan sebagai berikut.

$$B = \frac{\text{perubahan tekanan}}{\text{fraksi perubahan volume}} = \frac{\Delta P}{\Delta V / V}$$

dengan:

ΔP = perubahan tekanan

ΔV = perubahan volume

V = volume

Sifat inersia medium dinyatakan oleh massa jenis mediumnya (ρ). Kecepatan perambatan gelombang bunyi di dalam zat cair memenuhi persamaan sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Contoh Soal 1.13

Tentukanlah kecepatan perambatan gelombang bunyi di dalam air. Jika diketahui modulus Bulk air $2,25 \times 10^9 \text{ Nm}^{-2}$ dan massa jenis air 10^3 kgm^{-3} . Tentukan pula panjang gelombangnya, jika frekuensinya 4 kHz.

Jawaban:

Diketahui:

$$B = 2,25 \times 10^9 \text{ Nm}^{-2}; \rho = 10^3 \text{ kgm}^{-3}; f = 4 \times 10^3 \text{ Hz}$$

Kecepatan perambatan bunyi adalah sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{2,25 \times 10^9 \text{ Nm}^{-2}}{10^3 \text{ kgm}^{-3}}} = 1.500 \text{ ms}^{-1}$$

Panjang gelombang bunyi adalah sebagai berikut.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1.500 \text{ ms}^{-1}}{4 \times 10^3 \text{ Hz}} = 0,0375 \text{ m}$$

Bagimanakah jika perambatan bunyi tersebut terjadi di dalam tabung yang berisi gas? Dalam tabung yang berisi gas, modulus gas adalah $B = \gamma P$ dengan γ adalah

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

tetapan Laplace, γ yaitu, γ merupakan besaran untuk menunjukkan kapasitas kalor gas pada tekanan tetap dibagi kapasitas kalornya pada volume tetap. P adalah tekanan gas. Kecepatan gelombang bunyi dalam zat gas memenuhi gelombang bunyi dalam zat gas memenuhi persamaan berikut ini.

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$$

Contoh Soal 1.14

Suatu gas ideal memiliki tekanan $7,4 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$ dan rapat massanya $1,5 \text{ kgm}^{-3}$. Jika diketahui tetapan Laplace untuk gas tersebut adalah 1,4, tentukan kecepatan perambatan gelombang bunyi dalam gas tersebut.

Penyelesaian:

Diketahui: $P = 7,4 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$; $\rho = 1,5 \text{ kgm}^{-3}$; $\gamma = 1,4$

Kecepatan perambatan gelombang bunyi

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{(1,4)(7,4 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2})}{(1,4 \text{ kgm}^{-3})}} = 860,23 \text{ ms}^{-1}$$

Untuk medium berupa zat padat, modulus Bulk (B) digantikan dengan modulus Young (E) sehingga kecepatan perambatan gelombang bunyi dalam sebuah batang akan memenuhi persamaan sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

E adalah modulus Young sebuah batang bersatuan Nm^{-2} dan ρ adalah massa jenis batang bersatuan kgm^{-3} .

Tabel 1.2 Modulus Young dan Modulus Bulk Beberapa Bahan

Bahan	Modulus Young (Nm ⁻²)	Modulus Bulk (Nm ⁻²)
Besi	100×10^9	90×10^9
Baja	200×10^9	140×10^9
Kuningan	100×10^9	80×10^9
Aluminium	70×10^9	70×10^9

Beton	14×10^9	
Batubara	50×10^9	
Marmer	45×10^9	70×10^9
Granit	5×10^9	45×10^9
Nilon		
Air		2×10^9
Alkohol		1×10^9
Raksa		$2,5 \times 10^9$
Udara		$1,01 \times 10^5$

Contoh Soal 1.15

Tentukanlah kecepatan perambatan gelombang bunyi dalam besi yang memiliki modulus Young $2,5 \times 10^{11}$ Pa dan massa jenis $7,8 \times 10^3$ kgm⁻³.

Jawab:

Diketahui:

$$E = 2,5 \times 10^{11} \text{ Pa}; \rho = 7,8 \times 10^3 \text{ kgm}^{-3}$$

Kecepatan perambatan gelombang bunyi dalam batang besi adalah

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{2,5 \times 10^{11}}{7,8 \times 10^3}} = 5.064 \text{ ms}^{-1}$$

G. Tinggi Nada, Kuat Bunyi, dan Warna Bunyi

Bunyi dihasilkan dari suatu benda yang bergetar. Semakin banyak jumlah getar yang dihasilkan dalam satu selang waktu tertentu maka akan dihasilkan bunyi yang semakin nyaring. Dengan perkataan lain, jika frekuensi yang dihasilkan oleh suatu getaran semakin besar maka diperoleh bunyi yang semakin nyaring. Untuk memastikan hal tersebut, coba Anda lakukan kegiatan seperti tampak pada gambar di samping.

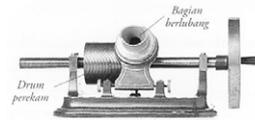
Pada gambar tersebut, seorang anak tampak sedang menempelkan batang lidi di sebuah jeruji roda sepeda yang sedang berputar. Jika roda tersebut diputar semakin cepat, apakah bunyi yang dihasilkan akan semakin nyaring?

Ternyata pada putaran yang lambat, bunyi yang terdengar bernada rendah. Pada saat putaran roda sepeda dipercepat, bunyi yang terdengar bernada tinggi. Ini membuktikan bahwa tinggi nada bergantung pada frekuensi sumber bunyi. Jadi, dapat disimpulkan bahwa tinggi nada bergantung pada frekuensi sumber bunyi.

Tahukah Anda?

Perekam Suara

Pada 1877, Thomas Alfa Edison



menemukan fonograf, sebuah alat untuk merekam sekaligus

Sumber: Buku Saku Penemuan, 1997



Gambar 1.60

Selang yang ditempelkan pada jeruji roda yang berputar dapat digunakan untuk menganalisis gelombang bunyi.

menghasilkan

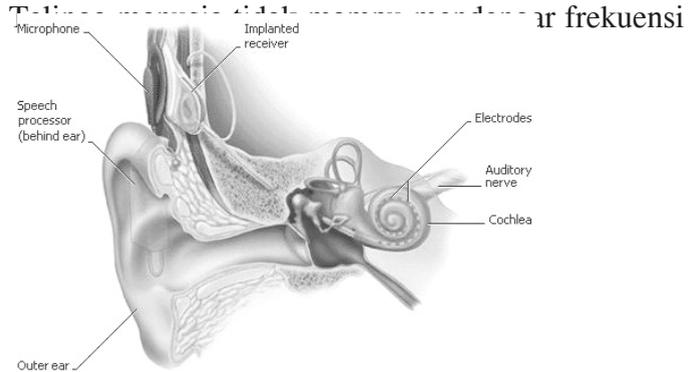
Frekuensi Tinggi \Rightarrow Bunyi Bernada Tinggi

menghasilkan

Frekuensi Rendah \Rightarrow Bunyi Bernada Rendah

Telingan manusia normal dapat mendengar bunyi yang frekuensinya antara 20 Hz sampai dengan 20.000 Hz. Di luar batas-batas frekuensi bunyi tersebut manusia tidak dapat mendengarnya. Frekuensi getaran di bawah 20 Hz disebut gelombang infrasonik.

Gambar 1.61
Bagian-bagian telinga



infrasonik ini. Frekuensi gelombang bunyi yang melebihi batas pendengaran manusia, yaitu frekuensi di atas 20.000 Hz disebut gelombang ultrasonik. Telinga kelelawar, anjing, dan lumba-lumba mampu menangkap gelombang ultrasonik ini. Pada saat terbang di malam hari, kelelawar mampu mendeteksi jika ada penghalang di depannya dengan menangkap pantulan gelombang ultrasonik yang dipancarkannya

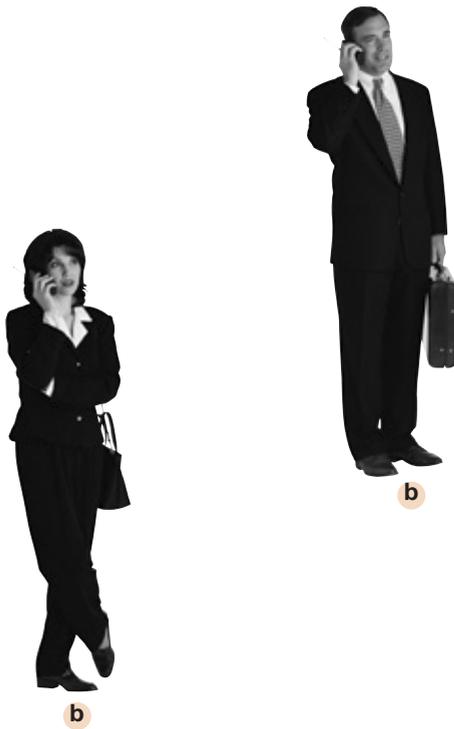


Gambar 1.62
Beberapa jenis hewan yang mampu menangkap gelombang ultrasonik.

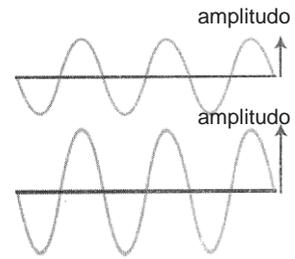
Sumber bunyi pun dapat kita peroleh dari sebuah generator audio, yaitu suatu generator yang dapat menghasilkan gelombang bunyi. Generator audio dapat menghasilkan bermacam-macam frekuensi dan amplitudo gelombang bunyi. Jika frekuensi dibuat tetap, sedangkan amplitudonya diperbesar maka akan diperoleh gelombang bunyi yang lebih kuat. Untuk mengetahui bentuk pulsa gelombang bunyi pada frekuensi tetap dengan amplitudo berbeda maka dapat diperoleh hasil rekaman gelombang dari sebuah generator audio seperti yang terlihat pada gambar berikut.

Jika seseorang dekat dengan sumber bunyi maka orang tersebut akan mendengarkan bunyi yang kuat dibandingkan dengan orang yang berada jauh dari sumber bunyi. Akan tetapi, keduanya sedang mendengarkan bunyi dengan frekuensi yang sama.

Coba Anda perhatikan gambar berikut ini.



Jika si A mendengar bunyi lebih kuat karena lebih dekat dengan sumber bunyi dibandingkan dengan si B yang jauh dari sumber bunyi. Karena amplitudo gelombang bunyi



Gambar 1.63

- a. gelombang bunyi dengan amplitudo kecil
- b. gelombang bunyi dengan amplitudo besar



Sumber bunyi

Gambar 1.64

Terompet dapat sebagai sumber

yang sampai pada si A lebih besar daripada si B. Adapun frekuensi yang terdengar oleh kedua pengamat adalah sama. Penurunan amplitudo disebabkan karena adanya penyebaran atau peredaman oleh medium. Jika sumber bunyi kita anggap titik maka energi per satuan luas pada r_1 dan r_2 berbanding terbalik dengan r_1^2 dan r_2^2 .

$$I_1 : I_2 = \frac{P}{A_1} : \frac{P}{A_2} = \frac{1}{4\pi r_1^2} : \frac{1}{4\pi r_2^2}$$

$$I_1 : I_2 = \frac{1}{r_1^2} : \frac{1}{r_2^2}$$

Jadi, intensitas bunyi yang terdengar oleh seseorang berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya ke sumber bunyi.

Sumber bunyi tidak bergetar hanya dengan nada dasar saja, tetapi diikuti oleh nada-nada atasnya. Gabungan antara nada dasar dengan nada-nada atas yang mengikutinya akan menghasilkan warna bunyi tertentu yang khas pula dengan alat tertentu. Bunyi khas yang dihasilkan sumber bunyi ini disebut warna bunyi. Misalnya warna bunyi biola berbeda dengan warna bunyi gitar. Walaupun setiap alat memancarkan frekuensi yang sama, tetapi akan menghasilkan warna bunyi yang berbeda. Perbedaan ini timbul karena nada atas yang menyertai nada dasarnya berbeda-beda. Nada dasar dan nada atas yang digabungkan akan menghasilkan nada yang bentuk gelombangnya berbeda dengan nada dasar, tetapi masih memiliki frekuensi tetap.

H. Interferensi Gelombang Bunyi

Jika suatu pagelaran musik diadakan di suatu gedung yang tidak memiliki kualitas akustik yang baik maka akan dihasilkan bunyi yang kurang enak didengar. Pada posisi tertentu terdengar dengung, sementara pada posisi lain terdengar bunyi yang sangat jelas. Bahkan, mungkin pada posisi lainnya tidak terdengar sama sekali. Keadaan demikian diakibatkan oleh adanya interferensi gelombang.

Interferensi adalah penggabungan dua atau lebih gelombang yang menghasilkan pola-pola gelombang baru. Penggabungan ini dapat menghasilkan tiga macam

pola gelombang, yaitu penguatan gelombang, penghilang gelombang, dan pencampuran gelombang yang bukan berupa penguatan atau penghilangan gelombang. Interferensi gelombang dapat diamati dengan eksperimen *Quincke*.

Penguatan gelombang terjadi akibat interferensi dua gelombang yang sefase. Jika interferensi terjadi antara gelombang yang memiliki frekuensi yang sama, namun arah simpangannya berlawanan maka dihasilkan penghilangan gelombang. Jika interferensi terjadi antara gelombang yang tidak memiliki frekuensi gelombang yang sama maka akan terjadi gelombang yang baru dengan frekuensi yang telah bergeser. Pergeseran frekuensi inilah yang menyebabkan bunyi yang terdengar tidak sama dengan bunyi semula sehingga timbul dengung.

Misalnya ada dua sumber bunyi yang masing-masing menghasilkan gelombang berfase sama dan mempunyai simpangan yang sama. Kedua sumber tersebut diletakkan sedemikian rupa sehingga jarak antara keduanya adalah s dan menghasilkan gelombang seperti gambar berikut ini.

Berdasarkan gambar tersebut, letak interferensi maksimum dan letak interferensi minimum dapat ditentukan sebagai berikut.

- a. Interferensi maksimum

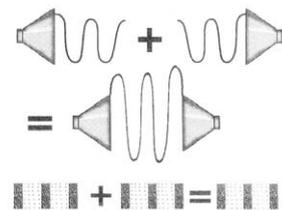
$$\Delta s = n\lambda, \text{ dengan } n = 0, 1, 2, \dots$$

- b. Interferensi minimum

$$\Delta s = \frac{1}{2}\lambda \quad \text{dan} \quad \frac{3}{2}\lambda$$

Secara umum, hal itu dapat ditulis sebagai berikut.

$$\Delta s = \frac{(2n+1)\lambda}{2} \quad \text{dengan } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

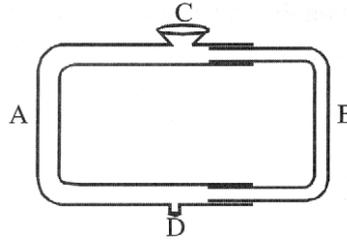


Gambar 1.65

Eksperimen 1.3

Mengamati Interferensi Gelombang Bunyi dengan Percobaan *Quincke*

1. Sediakan sebuah pipa seperti pada gambar dan sebuah garputala.
2. Susunlah pipa seperti pada gambar (ukuran pipa A lebih besar daripada pipa B).



Gambar1.44

3. Pada pipa B terdapat dua lubang, yaitu lubang C dan D. Pada lubang C dilengkapi dengan sebuah membran yang mudah bergetar.
4. Pipa A merupakan bagian yang tetap, sedangkan pipa B dapat digeser-geser.
5. Getarkan sebuah garputala pada lubang D.
6. Mula-mula, samakanlah panjang lintasan yang dapat dilalui oleh bunyi, yaitu DAC dan DBC. Akan tampak membran di C bergetar dengan kuat.
7. Kemudian, pipa B digeser ke kanan secara perlahan-lahan, sedangkan garputala tetap digetarkan sehingga akan tampak getaran membran di C melemah dan menguat secara berulang-ulang. Ukurlah panjang lintasan DBC ketika membran di C tidak bergetar sama sekali dan ketika getaran membran menguat kembali. Hitunglah selisih DBC dengan DAC.
8. Pada selisih panjang berapakah terjadi interferensi maksimum dan minimum? Coba Anda buat kesimpulannya mengenai interferensi gelombang bunyi berdasarkan eksperimen yang telah Anda lakukan.

Contoh Soal 1.16

Dua buah sumber bunyi dengan frekuensi sama terpisah sejauh 50 m. Seorang pendengar berdiri di antara kedua sumber bunyi tersebut. Orang itu berjalan sepanjang garis penghubung kedua sumber ke arah salah satu sumber bunyi. Ketika sampai di suatu posisi yang berjarak 34,7 m dari sumber yang dituju, orang tersebut mendengar interferensi minimum yang pertama kali. Jika cepat rambat bunyi di udara adalah 340 m/s, tentukan frekuensi yang dipancarkan oleh kedua sumber bunyi tersebut.

Jawaban:

Orde interferensi (n) = 1

$$s_1 = 34,7 \text{ m}$$

$$s_2 = 15,3 \text{ m}$$

$$v_{\text{udara}} = 340 \text{ m/s}$$

$$\Delta s = s_1 - s_2 = \frac{(2n+1)\lambda}{2}$$

$$\Delta s = 34,7 - 15,3 = \frac{(2 \times 1 + 1)\lambda}{2}$$

$$\lambda = 19,4 \times \frac{2}{3} = 12,93 \text{ m}$$

Dengan menggunakan persamaan berikut ini maka diperoleh frekuensinya

$$v = \lambda \cdot f \rightarrow f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340}{12,933} = 26,29 \text{ Hz}$$

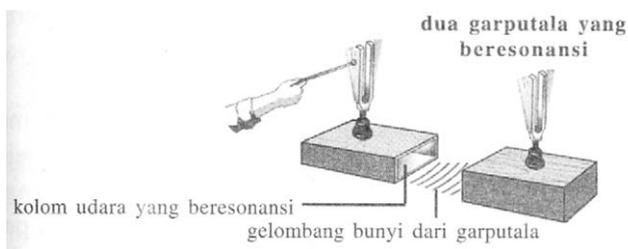
Jadi, kedua sumber tersebut memancarkan frekuensi 26,29 Hz.

I. Resonansi

Kamu pernah mendengar kata “resonansi”? Resonansi sangat penting dalam dunia musik. Dawai tidak dapat menghasilkan nada yang nyaring tanpa adanya kotak resonansi. Coba kamu perhatikan alat musik gitar, pada gitar terdapat kotak atau ruang udara tempat udara ikut bergetar apabila senar gitar dipetik. Udara dalam kotak udara ini bergetar dengan frekuensi yang sama dengan yang dihasilkan oleh senar gitar. Udara yang mengisi tabung gamelan juga ikut bergetar jika lempengan logam pada gamelan tersebut dipukul. Tanpa adanya tabung kolom udara di bawah lempengan logamnya, Anda tidak dapat mendengar nyarinya bunyi gamelan tersebut.

Jadi, resonansi adalah peristiwa ikut bergetarnya suatu benda karena ada benda lain yang bergetar dan memiliki frekuensi yang sama atau kelipatan bilangan bulat dari frekuensi sumber itu.

Jika sebuah garputala dipukul maka garputala tersebut akan ikut bergetar. Frekuensi bunyi yang dihasilkannya bergantung pada bentuk, besar, dan bahan garputala.

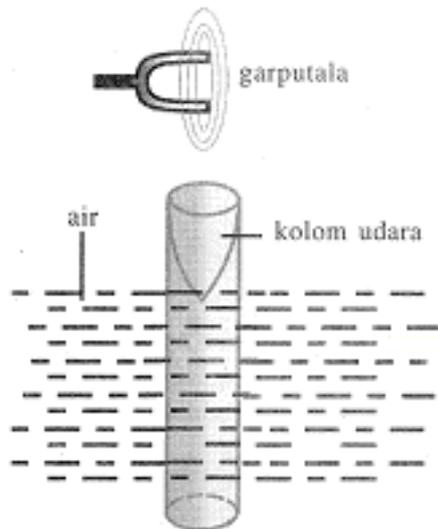


Gambar 1.66

Garputala yang digetarkan akan menghasilkan resonansi.

1. Resonansi pada Kolom Udara

Coba Anda perhatikan gambar berikut ini.



Gambar 1.67

Resonansi pada kolom

Gambar di atas menunjukkan apabila pada kolom udara yang terletak di atas permukaan air digetarkan sebuah garputala, molekul-molekul udara dalam kolom udara tersebut akan ikut bergetar.

Syarat terjadinya resonansi, antara lain sebagai berikut.

- Pada permukaan air harus terbentuk simpul gelombang.
- Pada ujung tabung bagian atas merupakan perut gelombang.

Peristiwa resonansi terjadi sesuai dengan getaran udara pada pipa organa tertutup. Jadi, resonansi pertama akan

terjadi jika panjang kolom udara di atas air $\frac{1}{4}\lambda$, resonansi kedua $\frac{3}{4}\lambda$, resonansi ketiga $\frac{5}{4}\lambda$, dan seterusnya.

Kolom udara pada percobaan penentuan resonansi di atas berfungsi sebagai tabung resonator. Peristiwa resonansi ini dapat dipakai untuk mengukur kecepatan perambatan bunyi di udara. Agar dapat terjadi resonansi,

panjang kolom udaranya $l = (2n-1)\frac{1}{4}\lambda$, dengan $n = 1, 2, 3, \dots$

Dari uraian di atas dapat ditentukan bahwa resonansi berurutan dapat Anda dengar, apabila satu resonansi den-

gan resonansi berikutnya memiliki jarak $\Delta l = \frac{1}{2} \lambda$. Jika frekuensi garputala diketahui, cepat rambat gelombang bunyi di udara dapat diperoleh melalui hubungan

Dari uraian di atas dapat ditentukan bahwa resonansi berurutan dapat Anda dengar, apabila satu resonansi den-

gan resonansi berikutnya memiliki jarak $\Delta l = \frac{1}{2} \lambda$. Jika frekuensi garputala diketahui, cepat rambat gelombang bunyi di udara dapat diperoleh melalui hubungan

$$v = \lambda f$$

2 . Eksperimen Kundt

Eksperimen Kundt dapat digunakan untuk menentukan cepat rambat gelombang dalam tabung gas pada suhu tertentu. Peristiwa ini dapat terjadi berdasarkan prinsip resonansi.

Langkah-langkah eksperimen Kundt adalah sebagai berikut.

1. Batang getar A dijepit di tengah-tengahnya, yaitu B. Kemudian, batang getar A digetarkan sehingga kolom udara dalam tabung yang berisi serbuk gabus ikut bergetar. Hal ini akan menunjukkan peristiwa resonansi, yaitu jika terlihat pengelompokan serbuk gabus seperti pada gambar.
2. Hal di atas dapat pula diperoleh dengan menggeser pengisap D maju atau mundur agar dalam tabung yang terbuat dari kaca it timbul gejala gelombang longitudinal stasioner yang kuat dan terlihat dengan pengelompokan serbuk gabus. Titik yang tidak bergetar adalah simpul.
3. Pada bagian simpul gelombang, serbuk gabus akan diam, sedangkan pada bagian perut gelombang akan terdapat amplitudo maksimum gelombang (bergerak kuat).

4. Dengan mengukur jarak antara dua simpul yang berurutan dapat ditentukan panjang gelombang dari gelombang yang terbentuk. Jarak simpul ke simpul adalah $v = \lambda f$.
5. Frekuensi getaran yang dihasilkan sama dengan frekuensi getaran batang A yang nilainya telah diketahui.
6. Oleh karena itu, cepat rambat gelombang dalam gas tersebut dapat ditentukan dengan persamaan $v = \lambda f$.

G. Taraf Intensitas Bunyi

Kepekaan telinga manusia normal terhadap intensitas bunyi memiliki dua ambang, yaitu ambang pendengaran dan ambang rasa sakit. Bunyi dengan intensitas di bawah ambang pendengaran tidak dapat terdengar.

Batas intensitas bunyi dapat merangsang pendengaran manusia berada antara 10^{-12} Wm^{-2} dan 1 Wm^{-2} . Untuk melihat bilangan yang lebih nyata, dipakai skala logaritma, yaitu logaritma perbandingan antara intensitas bunyi dan harga ambang intensitas bunyi yang Anda dengar dan disebut *taraf intensitas (TI)*.

Hubungan antara I dan TI dinyatakan persamaannya sebagai berikut.

$$TI = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

dengan:

I_0 = harga ambang intensitas pendengaran = 10^{-12} Wm^{-2}

I = intensitas bunyi (Wm^{-2})

TI = taraf intensitas (dinyatakan dalam desibel)

Tabel berikut adalah beberapa taraf intensitas macam

Tabel Taraf Intensitas Beberapa Macam Bunyi

No.	Sumber Bunyi	Taraf Intensitas (dB)	Intensitas (Wm^{-2})
1.	Pesawat jet pada jarak 30 m	140	100
2.	Ambang rasa sakit	120	1
3.	Musik hingar bingar	110	1×10^{-1}
4.	Lalu lintas ramai	70	1×10^{-5}

5.	Percakapan biasa	60	1×10^{-6}
6.	Radio pelan	40	1×10^{-8}
7.	Bisik-bisik	20	1×10^{-10}

bunyi sebagai berikut.

Taraf intensitas bergantung pada intensitas gelombang bunyi. Semakin jauh pengamat dari sumber bunyi, semakin lemah intensitas bunyi, dan semakin rendah pula taraf intensitasnya. Demikian pula apabila sumber bunyi semakin banyak intensitas dan taraf intensitasnya juga akan semakin besar.

Hubungan antara taraf intensitas dan jumlah sumber bunyi adalah sebagai berikut.

a. TI oleh sebuah sumber bunyi

$$TI_1 = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

b. TI oleh n sumber yang memiliki intensitas sama.

$$TI_n = 10 \log \frac{I}{I_0}, \text{ dengan } TI_1 = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

Dari kedua persamaan tersebut akan diperoleh sebagai berikut.

$$TI_n = 10 \log \frac{I}{I_0} + 10 \log n$$

$$TI_n = TI_1 + 10 \log n$$

Contoh Soal 1.17

Seorang anak SMA berteriak di lapangan sepak bola dan menghasilkan taraf intensitas 80 dB, diukur dari jarak 20 m. Jika ada 20 orang anak berteriak dengan intensitas bunyi yang sama dan diukur dari jarak 20 m, hitunglah taraf intensitas anak-anak tersebut.

Jawab:

$$TI_n = TI_1 + 10 \log n$$

$$TI_n = 80 + (10 \log 20) \text{ dB}$$

$$TI_n = 80 \text{ dB} + 13 \text{ dB}$$

$$TI_n = 93 \text{ dB}$$

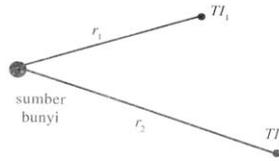
Hubungan antara taraf intensitas dan jarak adalah sebagai berikut.

a. TI_1 oleh sebuah sumber bunyi dari jarak r_1 .

$$TI_1 = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

- b. TI_2 oleh sebuah sumber bunyi dari jarak r_2 , akan memenuhi persamaan

$$TI_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0}$$



Dari gambar di atas maka diperoleh

$$I_1 : I_2 = \frac{1}{r_1^2} : \frac{1}{r_2^2}$$

$$\frac{I_2}{r_1^2} = \frac{I_1}{r_2^2} \Rightarrow I_2 = I_1 \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

$$TI_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0} = 10 \log \frac{I_1 r_1^2}{I_0 r_2^2}$$

$$TI_2 = 10 \log \frac{I_1}{I_0} + 10 \log \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

$$TI_2 = TI_1 + 10 \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2$$

$$TI_2 = TI_1 + 20 \log \frac{r_1}{r_2}$$

sehingga

$$TI_2 = TI_1 - 20 \log \frac{r_2}{r_1}$$

Contoh Soal 1.18

Taraf intensitas bunyi sebuah pompa air dari jarak 2 meter adalah 80 dB. Tentukanlah taraf intensitasnya jika diamati dari jarak 20 m.

Jawab:

$$TI_2 = TI_1 - 20 \log \frac{r_2}{r_1}$$

$$TI_2 = (80 \text{ dB}) - 20 \log \left(\frac{20}{2} \right) \text{ dB} = (80) - (26) = 54 \text{ dB}$$

K. Pemanfaatan Gelombang Ultrasonik

Gelombang ultrasonik dapat dimanfaatkan dalam berbagai bidang, seperti dalam bidang kedokteran di antaranya untuk mendeteksi bagian dalam organ tubuh. Dalam bidang industri, gelombang ultrasonik digunakan untuk mengetahui keretakan suatu material dari logam, dan gelombang ultrasonik juga dapat dipakai untuk mengukur kedalaman laut. Gelombang ultrasonik dapat dimanfaatkan karena memiliki sifat yang dapat dipantulkan. Oleh karena frekuensinya tinggi, gelombang ultrasonik tidak banyak mengalami gangguan oleh medium perantaranya sehingga yang terbawa oleh gelombang tersebut setelah mengalami pemantulan masih tetap besar.

1. Pemanfaatan dalam Bidang Kedokteran

Sebagaimana diketahui bahwa sifat gelombang ultrasonik yang dapat dipantulkan menjadikan gelombang ultrasonik dapat dimanfaatkan dalam bidang kedokteran, di antara untuk mengamati bagian dalam organ tubuh manusia.

Gelombang ini akan dipantulkan sebagian jika melewati bidang batas dua medium yang memiliki massa jenis berbeda dan sebagian lagi diteruskan. Dalam tubuh manusia yang diberi pancaran gelombang ultrasonik, gelombang tersebut akan dipantulkan jika mengenai jaringan-jaringan dalam tubuh, cairan dalam tubuh dan juga oleh tulang.

Pemeriksaan dengan menggunakan gelombang ultrasonik ini disebut dengan pemeriksaan USG (*ultrasonografi*). Alat ini digunakan untuk mendeteksi bagian dalam tubuh, seperti pemeriksaan lever, ginjal, dan juga janin dalam rahim ibu yang sedang hamil. Kelainan-kelainan yang terjadi dalam tubuh manusia akan dapat dianalisis oleh dokter. Demikian juga dalam kandungan dapat diketahui lebih dini.



Gambar 1.68

USG

2. Pemanfaatan dalam Mendeteksi Kerusakan Logam

Sebelum berkembangnya detektor ultrasonik, alat biasa dipakai sebagai alat tes tanpa merusak pada material adalah radiografi sinar-x. Dengan adanya detector ultrasonic yang sangat presisi, pemeriksaan suatu logam dapat menggunakan gelombang ultrasonik. Detektor gelombang ultrasonik juga dapat dipakai dalam pemeriksaan hasil pengelasan, baik pada pengelasan lempengan logam maupun pada pengelasan pipa-pipa. Bahkan, juga dipakai untuk mendeteksi keretakan pada logam, serta penipisan yang terjadi pada pipa-pipa atau dinding-dinding tangki yang tidak dapat diamati secara visual.

1. Pemanfaatan dalam Mengukur Kedalaman Laut

Ketika akan mengukur kedalaman laut, gelombang ultrasonik dipancarkan dari sebuah kapal di atas permukaan air laut. Gelombang merambat dalam air sampai ke dasar laut. Kemudian, gelombang tersebut dipantulkan oleh dasar laut. Gelombang ultrasonik yang terpantul akan terdeteksi oleh detektor yang ada di kapal. Jika kecepatan perambatan gelombang ultrasonik dalam air diketahui dengan cara mengukur waktu yang diperlukan gelombang ketika dikirim dan ketika diterima kembali, kedalaman laut dapat dihitung dan kedalaman laut adalah s . Maka, persamaannya dapat diperoleh sebagai berikut.

$$s = v \left(\frac{1}{2} t \right)$$

dengan:

s = kedalaman laut (m)

v = kecepatan gelombang dalam air (m/s)

t = waktu yang diperlukan gelombang datang dan pergi (s). Waktu yang diperlukan oleh gelombang untuk

menepuh jarak s adalah $\frac{1}{2} t$.

Contoh Soal 1.19

Sebuah alat sonar digunakan untuk mengukur kedalaman laut. Selang waktu yang dicatat oleh sonar untuk gelombang merambat sampai kembali lagi ke sonar adalah 1 detik. Cepat rambat gelombang dalam air laut adalah 1.500 m/s. Tentukan kedalaman air laut tersebut.

Penyelesaian:

$$v = 1.500 \text{ m/s}$$

$$t = 1 \text{ s}$$

$$s = v \left(\frac{1}{2} t \right)$$

$$s = 1.500 \times \frac{1}{2} \times 1$$

$$s = 750 \text{ m}$$

Jadi, laut tersebut memiliki kedalaman 750 m.

Ringkasan

Muka gelombang didefinisikan sebagai kedudukan titik-titik yang memiliki fase gelombang sama. Jarak antara dua muka gelombang berurutan adalah satu panjang gelombang. Muka gelombang dapat berupa lingkaran atau garis lurus.

Gelombang seismik dapat dikelompokkan menjadi tiga, yaitu gelombang primer P, gelombang sekunder S, dan gelombang permukaan (gelombang *Love* dan gelombang *Rayleigh*). Alat pencatat gelombang seismik Persamaan umum gelombang berjalan adalah:

$$y = A \sin \omega \left(t \pm \frac{x}{v} \right) \text{ atau } y = A \sin \omega (\omega t \pm kx)$$

Tanda (-) gelombang merambat ke sumbu- x positif, sedangkan tanda (+) gelombang merambat ke sumbu- x negatif.

Pemantulan gelombang pada ujung tali terikat.

$$y_d = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{\ell - x}{\lambda} \right)$$

$$y_d = -A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{\ell + x}{\lambda} \right)$$

$$y_{total} = 2A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{\ell + x}{\lambda} \right)$$

dengan $2A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right)$ disebut amplitudo gelombang superposisi. Letak simpul dari ujung pemantulan pada tali ujung tali terikat.

$$x = (2n) \frac{1}{4} \lambda$$

Letak perut pada ujung tali terikat.

$$x = (2n + 1) \frac{1}{4} \lambda$$

Pemantulan gelombang pada ujung tali bebas.

$$y_d = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{\ell - x}{\lambda} \right)$$

$$y_p = -A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{\ell + x}{\lambda} \right)$$

$$y_{total} = 2A \cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right) \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{\ell + x}{\lambda} \right)$$

Dengan $2A \cos 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} \right)$ disebut amplitudo gelombang superposisi.

Letak simpul dari ujung pemantulan pada ujung tali bebas.

$$x = (2n + 1) \frac{1}{4} \lambda$$

Letak perut pada ujung tali bebas.

$$x = (2n) \frac{1}{4} \lambda$$

Kecepatan perambatan gelombang pada Dawai.

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Refleksi dan transmisi gelombang pada sambungan tali tipis (μ_1) dan tali tebal (μ_2) dengan gelombang datang dari tali tipis.

$$A_p = \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2} A_d \quad \text{atau} \quad A_t = \frac{2v_2}{v_1 + v_2} A_d$$

$$\text{Koefisien refleksi: } \frac{A_p}{A_d} = \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2}$$

$$\text{Koefisien transmisi: } \frac{A_t}{A_d} = \frac{2v_2}{v_1 + v_2}$$

Perbandingan frekuensi pada dawai memenuhi $f_0 : f_1 : f_2 = 1 : 2 : 3$.

Perbandingan frekuensi pada pipa organa terbuka memenuhi $f_0 : f_1 : f_2 = 1 : 3 : 5$.

Pelayangan gelombang memenuhi persamaan

$$f_p = f_2 - f_1, \text{ dengan } f_2 > f_1$$

Intensitas gelombang (I) dan energi gelombang (E) memenuhi persamaan.

$$I = \frac{P}{4\pi R^2} \quad \text{dan} \quad E = 2\pi^2 m f^2 A^2$$

Hukum Snellius pada pemantulan gelombang: "Gelombang datang, gelombang pantul, dan garis normal terletak pada satu bidang datar, dan sudut gelombang datang sama dengan sudut gelombang pantul."

Hukum Snellius pada pembiasan gelombang memenuhi persamaan

$$n_{12} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Persamaan Umum Efek Doppler memenuhi

$$\text{persamaan} \quad f_p = \frac{v \pm v_p}{v \pm v_s} f_s$$

Pola interferensi dua celah

$$\text{Interferensi maksimum} \quad \frac{Pd}{\ell} = m\lambda$$

$$\text{Interferensi minimum} \quad \frac{Pd}{\ell} = (2m - 1)\lambda$$

Pola interferensi oleh lapisan tipis interferensi maksimum

$$2nd \cos r = (2m + 1) \frac{1}{2} \lambda$$

$$\text{Interferensi minimum} \quad 2nd \cos r = m\lambda$$

Pola Difraksi oleh celah tunggal

Difraksi maksimum

$$2nd \cos r = (2m - 1) \frac{1}{2} \lambda$$

Difraksi minimum

$$d \sin r = m\lambda$$

Pola difraksi oleh kisi

$$\text{Difraksi maksimum} \quad d \sin \theta = m\lambda$$

Difraksi minimum

$$d \sin \theta = (2m + 1) \frac{1}{2} \lambda$$

Daya urai atau daya pisah alat optik

$$\theta_m = \frac{1,22\lambda}{D} \quad \text{atau} \quad d_m = \frac{1,22\lambda \ell}{D}$$

Polarisasi selektif oleh dua pelat polaroid.

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 \quad \text{dan} \quad I_2 = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \theta$$

Sudut polarisasi

$$\tan i_p = \frac{n_2}{n_1}$$

Untuk mengukur kecepatan perambatan bunyi diudara dapat digunakan tabung resonansi.

Kecepatan perambatan bunyi di dalam zata cair memenuhi persamaan

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Kecepatan perambatan bunyi di dalam gas memenuhi persamaan

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}}$$

Kecepatan permbatan bunyi didalam zat padat memenuhi persamaan

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Tinggi nada dipengaruhi oleh frekuensi bunyi. Kuat bunyi untuk frekuensi sama dipengaruhi oleh amplitudo bunyi.

Intensitas suatu bunyi pada jarak tertentu dari sumber bunyi berbanding terbalik dengan kuadrat jarak pengamat ke sumber bunyi.

$$I_1 : I_2 = \frac{1}{r_1^2} : \frac{1}{r_2^2}$$

Interferensi maksimum dari dua sumber bunyi, akan teramati jika beda jarak kedua sumber ke pengamat adalah

$$\Delta S = n\lambda, \text{ dengan } n = 1, 2, 3, \dots$$

Interferensi minimumnya terjadi apabila

$$\Delta S = (2n-1)\frac{1}{2}\lambda, \text{ dengan } n = 1, 2, 3, \dots$$

Peristiwa resonansi didalam tabung resonansi dapat terjadi untuk panjang kolom udara.

$$\ell = (2n-1)\frac{1}{4}\lambda, \text{ dengan } n = 1, 2, 3, \dots$$

Resonansi berurutan dapat terjadi jika

$$\Delta \ell = \frac{1}{2}\lambda$$

Taraf intensitas sebuah sumber bunyi pada jarak tertentu dirumuskan sebagai berikut.

$$TI = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

Taraf intensitas yang dihasilkan oleh sebuah sumber bunyi adalah TI_1 . Taraf intensitas oleh n buah sumber bunyi yang sama dari jarak sama adalah $TI_n = TI_1 + 10 \log n$

Taraf intensitas dari posisi (1) adalah TI_1 , berjarak r_1 dari sumber dan dari posisi (2) adalah TI_2 , berjarak r_2 dari sumber memenuhi persamaan

$$TI_2 = TI_1 - 20 \log \frac{r_2}{r_1}$$

Ultrasonik dapat digunakan dalam bidang kedokteran, untuk mendeteksi bagain dalam tubuh untuk mendeteksi kerusakan logam dalam industri logam dan untuk mengukur kedalaman laut.

Uji Kompetensi Bab 1

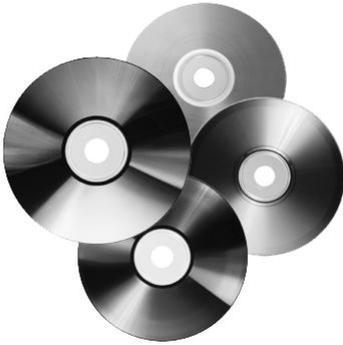
A. Pilihlah satu jawaban yang benar.

- Gelombang tranversal adalah gelombang yang arah getarannya
 - berlawanan dengan arah rambatannya
 - tegak lurus dengan arah rambatannya
 - searah dengan arah rambatannya
 - sejajar dengan arah rambatannya
 - membentuk sudut lancip dengan arah rambatannya
- Jarak antara dua muka gelombang yang berdekatan pada permukaan air disebut sebagai satu
 - periode gelombang
 - frekuensi gelombang
 - panjang gelombang
 - amplitudo gelombang
 - fase gelombang
- Gejala yang dapat dialami oleh gelombang transversal, tetapi tidak dimiliki oleh gelombang longitudinal adalah
 - polarisasi
 - difraksi
 - interferensi
 - refraksi
 - refleksi
- Dari suatu tempat ke tempat lainnya, gelombang memindahkan
 - massa
 - amplitudo
 - panjang gelombang
 - energi
 - fase
- Bunyi tidak dapat merambat dalam medium
 - udara
 - air
 - gas oksigen
 - gas nitrogen
 - ruang hampa
- Efek mana yang hanya ditunjukkan oleh gelombang transversal
 - difraksi
 - pelayangan
 - interferensi
 - efek Dopler
 - polarisasi
- Dua buah tali panjangnya sama ditarik oleh gaya peregangan yang sama. Massa tali pertama adalah 9 kali massa tali kedua. Tali pertama digetarkan dengan frekuensi 200 Hz, sedangkan tali kedua digetarkan dengan frekuensi 400 Hz. Apabila panjang gelombang pada tali pertama adalah 4 cm maka panjang gelombang tali kedua adalah
 - 1
 - 2
 - 4
 - 6
 - 8
- Suatu gelombang berjalan melalui titik A dan B yang berjarak 8 cm dalam arah dari A ke B. Pada saat $t = 0$, simpangan gelombang di A adalah 0. Jika panjang gelombangnya 32 cm dan amplitudonya 6 cm maka simpangan titik B pada saat fase A = $\frac{4p}{3}$ adalah ... cm.
 - 3
 - $3\sqrt{2}$
 - $3\sqrt{3}$
 - 4
 - 6
- Gelombang transversal merambat dari A ke B dengan cepat rambat 12 m/s pada frekuensi 4 Hz dan amplitudonya 5 cm. Jika jarak AB = 18 m maka banyaknya gelombang yang terjadi sepanjang AB adalah
 - 9
 - 8
 - 7
 - 6
 - 4
- Gelombang sinus menjalar pada tali yang panjangnya 80 cm. Jika suatu titik untuk bergerak dari simpangan maksimum nol memerlukan waktu 0,05 detik maka tegangan tali apabila panjang gelombang 0,5 m dan massa tali 940 gram adalah

- a. prisma kromatis
 b. prisma abrasi
 c. prisma pandang lurus
 d. prisma astigmatis
 e. prisma akromatis
20. Seberkas cahaya mengenai suatu celah yang lebarnya 0,4 mm secara tegak lurus. Dibelakang celah terdapat sebuah lensa positif dengan jarak fokus 40 cm. Garis terang pusat dengan garis gelap pertama pada layar di bidang fokus lensa berjarak 0,56 mm. Panjang gelombang cahaya yang digunakan adalah
- a. $4,67 \times 10^{-7} \text{m}$
 b. $4,63 \times 10^{-8} \text{m}$
 c. $2,75 \times 10^6 \text{m}$
 d. $3,70 \times 10^{-7} \text{m}$
 e. $2,70 \times 10^{-8} \text{m}$

Physics in Action

Compact Disk (CD)



Sebuah CD memiliki serangkaian lubang mikroskopis yang ketebalannya 30 kali lebih tipis dari rambut manusia. Ketika sinar laser ditembakkan ke permukaan bidang datar yang dapat memantulkan cahaya, sinar tersebut langsung dipantulkan ke sistem optik dan akan menghasilkan pulsa “on”. Akan tetapi, jika sinar laser tersebut jatuh di permukaan yang berlubang, banyaknya sinar laser tersebut diterima oleh sistem optik akan berkurang sehingga akan menghasilkan pulsa “off” yang saling berganti akan menghasilkan kode biner 1 dan 0. Kode ini kemudian diartikan sebagai informasi.

Jumlah rata-rata lubang mikroskopis pada CD yang teramati sebanyak 44.000 kali per sekon. Satu CD dapat mengandung jutaan informasi. Semua informasi tersebut dikodekan pada permukaan tempat cahaya mudah dipantulkan dan dilapisi oleh plastik bening. Penggunaan CD telah meluas, hampir seluruh masyarakat telah menggunakannya. Dengan CD, bunyi atau suara musik yang dihasilkan akan sejenis dan sejelas ketika kamu mendengarkan konser musik dalam studio. Oleh karena detektor tidak menyentuh CD, CD tersebut tidak gampang rusak dan dapat dipakai sesering mungkin.

Bab 2



Sumber: CD Encarta, 2004

Listrik Statis

Betapa sulitnya manusia memberikan gambaran tentang situasi dunia pada beberapa abad yang lalu ketika pemakaian listrik baru saja dimulai. Pada waktu itu, beberapa orang telah memiliki penerangan listrik di rumahnya. Motor listrik dan baterai kuno yang dipakai pada waktu itu masih merupakan suatu keajaiban. Sungguh sangat berbeda dengan keadaan sekarang ini, banyak benda yang ada di sekitar kita menggunakan listrik dalam berbagai cara. Oleh karena pemakaiannya yang begitu luas maka kita perlu mempelajari bagaimana listrik memberikan suatu pengaruh pada dunia tempat kita berada.

Studi tentang listrik dibagi menjadi dua bagian, yaitu listrik statis (*electrostatic*) dan listrik dinamik (*electrodinamic*). Listrik statis mempelajari muatan listrik yang berada dalam keadaan diam, sedangkan listrik dinamik mempelajari muatan listrik yang bergerak yang disebut arus listrik.

Standar Kompetensi

Penerapan konsep kelistrikan dan kemagnetan dalam berbagai penyelesaian masalah dan produk teknologi

Kompetensi Dasar

Memformulasikan gaya listrik, kuat medan listrik, energi potensial listrik energi potensial listrik, serta penerapannya pada keping sejajar

- A. Hukum Coulomb
- B. Kuat Medan Listrik
- C. Hukum Gauss
- D. Energi Potensial Listrik
- E. Kapasitor

A. Hukum Coulomb

Kata Kunci

Listrik Statis
Muatan
Coulomb
Kuat Medan
Kapasitor
Dielektrik

1. Interaksi Elektrostatik antara Dua Muatan

Mari kita coba melakukan percobaan. Coba Anda siapkan dua buah batang kaca dan sehelai kain sutera. Gosoklah kedua batang kaca itu dengan kain sutera. Gantungkan batang kaca pertama dengan benang pada posisi mendatar. Bawalah batang kaca kedua mendekati batang kaca pertama. Apakah yang terjadi?

Ulangi percobaan itu dengan dua batang plastik (misalnya sisir plastik) yang digosok dengan kain wol. Akan kita amati bahwa batang kaca itu pun tolak-menolak dengan kain wol.

Coba Anda ulangi lagi percobaan itu dengan mendekatkan batang plastik ke batang kaca yang digantung. Ternyata kedua batang itu tarik-menarik.

Kesimpulan yang dapat kita peroleh dari percobaan tersebut antara lain sebagai berikut.

- Muatan listrik dibagi dua jenis, yaitu muatan listrik positif dan muatan negatif. Batang kaca dan benda-benda bermuatan listrik lain yang bertingkah seperti batang kaca bermuatan positif. Batang plastik dan benda-benda bermuatan listrik lain yang bertingkah seperti batang plastik bermuatan negatif.
- Dua benda bermuatan sejenis tolak-menolak dan dua benda bermuatan tidak sejenis tarik-menarik.



Gambar 2.1

Apa yang menyebabkan ujung-ujung rambut seorang wanita yang memegang bola lagaam pemberi muatan menjadi berdiri

2. Terjadinya Muatan Listrik

Batang kaca digosok dengan kain sutera menjadi bermuatan negatif. Batang plastik digosok dengan wol menjadi bermuatan listrik positif. Bagaimana kita menjelaskan hal ini?

Model atom Rutherford menyatakan bahwa atom disusun oleh sejumlah proton bermuatan positif yang terdapat dalam inti atom yang dikelilingi oleh sejumlah elektron bermuatan negatif. Atom bersifat netral karena jumlah proton dalam inti atom sama dengan jumlah elektron yang mengitari inti atom.

Hanya elektron yang berperan pada interaksi antara satu atom dengan atom lainnya. Elektron dapat keluar atau

masuk ke dalam susunan atom, terutama elektron terluar yang dinamakan elektron valensi. Jika elektron keluar dari susunan atom maka jumlah proton bermuatan positif lebih banyak dari jumlah elektron bermuatan negatif sehingga atom menjadi bermuatan positif. Jika elektron masuk pada susunan atom maka jumlah proton bermuatan positif lebih sedikit dari jumlah elektron yang bermuatan negatif sehingga atom bermuatan negatif.

Ketika batang digosok dengan wol, elektron-elektron wol menuju ke batang plastik sehingga batang plastik kelebihan elektron dan batang plastik menjadi bermuatan negatif. Ketika batang kaca digosok dengan kain sutera, elektron-elektron batang kaca menuju ke kain sutera sehingga batang kaca kekurangan elektron dan batang kaca menjadi bermuatan positif.

Contoh Soal 2.1

Terdapat empat jenis muatan, yaitu P, Q, R, dan S. Muatan P tarik-menarik dengan muatan Q, tetapi tolak-menolak dengan muatan R. Muatan R tarik-menarik dengan muatan S. Tentukan jenis muatan P, Q, dan R, jika S bermuatan negatif.

Penyelesaian:

Muatan R dan S tarik-menarik. Oleh karena S bermuatan negatif, R bermuatan positif.

Muatan P dan R tolak-menolak. Oleh karena R bermuatan positif, P bermuatan positif.

Muatan P dan Q tarik-menarik. Oleh karena P bermuatan positif, Q bermuatan negatif.

3. Gaya Coulomb antara Dua Muatan Titik

Dua muatan listrik sejenis tolak-menolak dan dua muatan listrik tidak sejenis tarik-menarik. Ini berarti antara dua muatan listrik timbul gaya listrik (tolak-menolak atau tarik-menarik). Bagaimana besar gaya ini terhadap besar muatan dan jarak antara kedua muatan? Hubungan gaya tarik atau tolak antara dua bola bermuatan dengan jarak kedua muatan ditentukan oleh seorang pakar fisika berkebangsaan Prancis bernama **Charles Coulomb**, pada 1785. Dalam eksperimennya, Coulomb menggunakan sebuah neraca puntir.

Jika bola A yang bermuatan diletakkan pada tempatnya maka bola B ditolak oleh bola A (bola B dan A keduanya

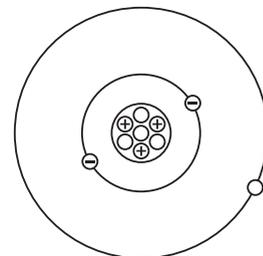
Tahukah Anda?



Mesin Fotokopi

Mesin fotokopi menggunakan muatan listrik statis untuk menangkap bubuk hitam (toner) pada kertas. Mesin fotokopi dibuat pada 1938 oleh pengacara Amerika Serikat Chester Carlson, yang ingin membuat salinan dokumen-dokumennya secara cepat dan bersih.

Sumber: Buku Saku Penemuan, 1997



- ⊖ elektron
- ⊕ proton
- neutron

Gambar 2.2

Model atom litium (${}^7_3\text{Li}$). Jumlah elektron yang bermuatan negatif sama dengan jumlah proton yang bermuatan positif

bermuatan positif). Ini mengakibatkan lengan neraca terputir dan dalam keadaan seimbang lengan neraca mencapai kedudukan yang baru.

Dari sudut puntiran ini, Coulomb mengukur besar gaya listrik. Dengan mengubah-ubah jarak antara bola B dan A, gaya listrik dapat diukur sebagai fungsi jarak. Coulomb menyimpulkan bahwa gaya tarik atau gaya tolak berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua bola bermuatan.

Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

Bagaimana muatan mempengaruhi gaya listrik tersebut? Pertama kali Coulomb mengukur gaya tolak antara bola A dan bola B pada suatu jarak tertentu. Kemudian, ia pun membagi muatan bola A menjadi dua sehingga muatan A menjadi setengah muatan awalnya. Ia mendapatkan bahwa besar gaya tolak menjadi setengah kali semula. Percobaan diulangi dengan membagi muatan bola A menjadi seperempat muatan awalnya. Ia mendapatkan bahwa besar gaya tolak menjadi seperempat kali semula. Coulomb menarik kesimpulan bahwa gaya tarik atau gaya tolak antara dua bola bermuatan sebanding dengan muatan-muatannya.

Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$F \propto q_1 \cdot q_2$$

Dengan cara menggabungkan kedua kesimpulan ini, Coulomb menyatakan hukumnya yang dinamakan hukum Coulomb, yaitu:

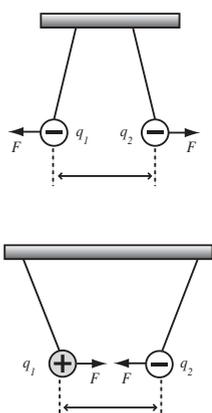
“Gaya tarik atau tolak antara dua muatan listrik sebanding dengan muatan-muatannya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan.”

Secara matematis hukum Coulomb dapat dinyatakan sebagai berikut.

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

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$



Gambar 2.3

- a) Gaya interaksi elektrostatik antarmuatan sejenis tolak-menolak
- b) Gaya interaksi elektrostatik antarmuatan tidak sejenis tarik-menarik

dengan:

F = besar gaya Coulomb (N)

q_1, q_2 = muatan masing-masing partikel (coulomb, disingkat C)

r = jarak pisah antar kedua muatan (m)

ϵ_0 = permisivitas ruang hampa = $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$$

Gaya Coulomb mirip gaya gravitasi yaitu keduanya adalah gaya yang berbanding terbalik dengan kuadrat jarak. Kedua gaya ini tergolong sebagai gaya alamiah. Pada saat ini, ada empat macam gaya alamiah yang telah diketahui antara sebagai berikut.

- Gaya gravitasi, bekerja pada semua partikel dan menjaga planet-planet tetap pada orbitnya mengitari matahari.
- Gaya elektromagnetik, bekerja di antara partikel bermuatan dan merupakan gaya yang mengikat atom-atom dan molekul-molekul.
- Gaya lemah (*weak force*), terjadi dalam peristiwa peluruhan radioaktif.
- Gaya kuat (*strong force*), menjaga neutron-neutron dan proton-proton bersama-sama dalam sebuah inti atom.

Contoh Soal 2.2

Dua keping logam yang sama diberi muatan sama besar. Berapakah muatan di setiap keping jika diketahui gaya Coulomb yang terjadi 2 N dan jarak antarkeping logam 1,5 m?

Jawab:

Diketahui:

$$F_c = 2 \text{ N}$$

$$r = 1,5 \text{ m}$$

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad \text{dimana } q_1 = q_2 = q$$

$$q^2 = \frac{F_c \cdot r^2}{k} = \sqrt{\frac{F_c \cdot r^2}{k}}$$

$$q^2 = \sqrt{\frac{F_c \cdot r^2}{k}} = (1,5) \sqrt{\frac{2}{9 \times 10^9}} \quad q^2 = 2,24 \times 10^{-5} \text{ C} = 22,4 \mu\text{C}$$

Jadi, besarnya muatan listrik di setiap keping adalah $22,4 \mu\text{C}$.

Tahukah Anda?



Penangkal Petir Pertama

Benjamin Franklin menyadari bahwa ada cara yang sederhana untuk menghentikan kerusakan gedung-gedung tinggi dari sambaran petir. Agar petir menyambar lempeng logam, bukan bagian lain dari gedung tersebut, Franklin memasang lempeng logam runcing pada bagian atas gedung. Dia menyusun lempeng tersebut sehingga benar-benar pada posisi tertinggi dari gedung tersebut.

Sumber: Eureka, 2004

4. Gaya Coulomb dalam Bahan

Apabila medium muatan bukan ruang hampa udara maka besar gaya Coulomb antara muatan q_1 dan q_2 berkurang ($F_{\text{bahan}} < F_{\text{udara}}$). Jika medium memiliki permisivitas relatif ϵ_r (dahulu disebut tetapan dielektrik k) maka tetapan ϵ_0

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$
pada $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$ harus diganti dengan permisivitas bahan ϵ yang dirumuskan oleh:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

dalam ruang hampa $\epsilon_r = 1$ dan dalam udara $\epsilon_r = 1,0006$ Jadi, gaya Coulomb dalam bahan dirumuskan oleh:

$$F_{\text{bahan}} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \times \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Jika gaya Coulomb dalam ruang hampa dibandingkan dengan gaya Coulomb dalam bahan maka kan diperoleh

$$\frac{F_{\text{bahan}}}{F_{\text{vakum}}} = \frac{\frac{1}{4\pi\epsilon} \times \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}}{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}} = \frac{\epsilon_0}{\epsilon}$$

Dengan cara memasukkan nilai $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ diperoleh:

$$\frac{F_{\text{bahan}}}{F_{\text{vakum}}} = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} = \frac{1}{\epsilon_r}$$

$$F_{\text{bahan}} = \frac{1}{\epsilon_r} \times F_{\text{vakum}}$$

Contoh Soal 2.3

Dua buah muatan masing-masing $20 \mu\text{C}$ dan $24 \mu\text{C}$ terpisah pada jarak 12 cm. Hitung besar gaya yang bekerja pada kedua muatan tersebut jika:

- kedua muatan diletakkan di udara;
- kedua muatan diletakkan dalam bahan yang memiliki permisivitas relatif 3.

Jawab:

$$q_1 = 20 \mu\text{C} = 20 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$q_2 = 24 \mu\text{C} = 24 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$r = 12 \text{ cm} = 12 \times 10^{-2} \text{ m}$$

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

a. Apabila kedua muatan diletakkan di udara

$$F_{\text{udara}} = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

$$F_{\text{udara}} = (9 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}) \frac{(20 \times 10^{-6} \text{ C})(24 \times 10^{-6} \text{ C})}{12 \times 10^{-2} \text{ m}}$$

$$F_{\text{udara}} = 300 \text{ N}$$

b. Apabila kedua muatan diletakkan dalam bahan yang memiliki

permisivitas relatif $\epsilon_r = 3$, gaya Coulomb dalam bahan dihitung dengan persamaan

$$F_{\text{bahan}} = \frac{1}{\epsilon_r} F_{\text{udara}}$$

$$F_{\text{bahan}} = \frac{1}{3} (300 \text{ N})$$

$$F_{\text{bahan}} = 100 \text{ N}$$

5. Resultan Gaya Coulomb pada Sebuah Muatan Akibat Beberapa Muatan

Kita telah mempelajari gaya yang dialami sebuah bola bermuatan karena adanya bola bermuatan lain di dekatnya. Sekarang timbul pertanyaan, bagaimana vektor gaya Coulomb yang dialami oleh sebuah bola bermuatan karena adanya dua atau lebih bola bermuatan lain di dekatnya? Dalam hal ini ukuran bola bermuatan dianggap jauh lebih kecil daripada ukuran jarak antara bola sehingga bola dapat dianggap sebagai benda titik atau partikel.

Gambar di atas menunjukkan vektor-vektor gaya Coulomb yang bekerja pada muatan q_2 . Vektor gaya Coulomb pada q_2 yang hanya disebabkan oleh muatan q_1 adalah F_{21} (tolak-menolak) dan yang hanya disebabkan oleh muatan

Fisikawan Kita



Charles Agustin de Coulomb (1736-1806)

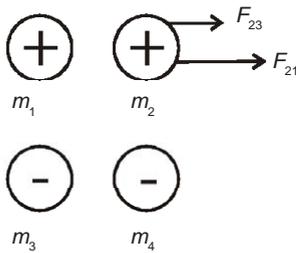
Charles Agustin de Coulomb (1736-1806) adalah seorang ahli fisika Prancis, penemu hukum Coulomb (1785) dan neraca puntir (1777). Ia lahir di Augouleme, Prancis pada 14 Juni 1736 dan meninggal di Paris pada 23 Agustus 1806 di usia 70 tahun. Ia sangat terkenal karena dapat mengukur gaya listrik dan gaya magnetik dengan teliti. Untuk menghormatinya nama Coulomb diabdikan sebagai satuan muatan listrik, yaitu coulomb (C). Pada 1779, ia juga mempelajari dan menganalisis gaya gesek pada bagian-bagian mesin yang berputar. Dengan demikian, Coulomb adalah orang yang pertama mengemukakan teori pelumasan. Pada tahun itu juga ia berhasil membuat alat kerja di bawah permukaan air yang bernama caisson.

Sumber: Tokoh-Tokoh Terkenal Ilmuwan, 2000

q_3 adalah F_{23} (tarik-menarik) seras yang hanya disebabkan oleh muatan q_4 adalah F_{24} (tola-menolak). Anda dapat melihat ampak ada tiga vektor gaya Coulomb yang bekerja pada q_2 , yaitu F_{21} , F_{23} , dan F_{24} . Gaya tolak yang bekerja pada q_2 merupakan resultan dari ketiga vektor gaya ini, antara lain.

$$F_2 = F_{21} + F_{23} + F_{24}$$

Secara umum, gaya total yang bekerja pada sebuah muatan merupakan resultan (penjumlahan vektor) dari gaya-gaya yang bekerja pada muatan tersebut akibat interaksi dengan muatan-muatan yang ada di sekitarnya.



Gambar 2.4

Gaya coulomb pada muatan m_2 akibat muatan m_1 , m_3 dan m_4

a. Apabila muatan q_3 diletakkan di tengah-tengah kedua muatan negatif. Maka,

$$r_{31} = r_{32} = \frac{0,5}{2} = 25 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$F_{31} = k \frac{q_3 \cdot q_1}{r_{31}^2} \quad \text{dan} \quad F_{32} = k \frac{q_3 \cdot q_2}{r_{32}^2}$$

Dengan menganggap $F_{31} > F_{32}$ maka besar resultan gaya Coulomb pada q_3 , ayitu F_3 adalah:

$$F_3 = F_{31} - F_{32}$$

$$F_3 = k \frac{q_3 \cdot q_1}{r_{31}^2} - k \frac{q_3 \cdot q_2}{r_{32}^2}, \text{ dengan } r_{31} = r_{32}$$

$$F_3 = k \frac{q_3}{r_{31}^2} (q_1 - q_2)$$

$$F_3 = (9 \times 10^9) \left(\frac{5 \times 10^{-6}}{25 \times 10^{-2}} \right) (9 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-6})$$

$$F_3 = 36 \times 10^{-1} \text{ N} = 3,6 \text{ N}$$

b. Misalkan muatan q_3 diletakkan x m dari muatan q_1 . Maka,

$$r_{31} = x \text{ m}$$

$$r_{32} = (-0,5 - x) \text{ m}$$

Agar resultan gaya Coulomb pada q_3 sama dengan nol maka gaya Coulomb pada q_3 , oleh q_1 harus sama dengan besar gaya Coulomb pada q_3 oleh q_2 .

$$F_{31} = F_{32}$$

$$k \frac{q_3 \cdot q_1}{r_{31}^2} = k \frac{q_3 \cdot q_2}{r_{32}^2}$$

$$\left(\frac{r_{32}}{r_{31}} \right)^2 = \frac{q_2}{q_1} = \frac{4 \times 10^6}{9 \times 10^6} = \frac{4}{9}$$

$$\frac{r_{32}}{r_{31}} = \sqrt{\frac{4}{9}} = \frac{2}{3}$$

$$2r_{31} = 3r_{32}$$

$$2(x) = 3(0,5 - x)$$

$$2x = 1,5 - 3x$$

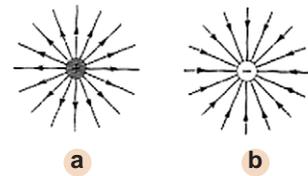
$$5x = 1,5 \Rightarrow x = 0,3$$

Jadi, agar resultan gaya Coulomb pada q_3 sama dengan nol maka muatan q_3 diletakkan 0,3 m dari q_1 .

B. Kuat Medan Listrik

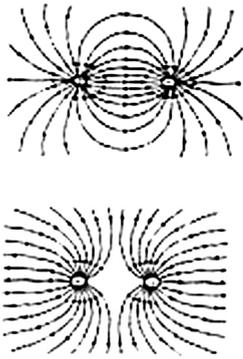
Gaya antara dua buah partikel bermuatan yang dipisahkan suatu jarak tertentu tanpa kontak antara keduanya disebut *action at a distance*. Cara pandang lain dalam melihat gaya listrik yaitu dengan menggunakan konsep medan. Medan adalah ruang di sekitar benda yang setiap titik dalam ruang tersebut akan terpengaruh oleh gaya yang ditimbulkan oleh benda. Oleh karena partikel akan menghasilkan gaya listrik, medan di sekitar partikel itu disebut medan listrik.

Medan listrik adalah besaran vektor yang arahnya pada suatu titik tertentu didefinisikan oleh Michael Faraday sebagai arah gaya yang dialami oleh suatu benda bermuatan positif. Medan listrik dapat digambarkan dengan garis-garis gaya listrik yang menjauhi (keluar dari) muatan positif dan mendekati (masuk ke) muatan negatif.



Gambar 2.5

- a) Garis-garis gaya listrik untuk sebuah bola bermuatan positif
- b) Garis-garis gaya listrik untuk sebuah bola bermuatan negatif



Gambar 2.6

Garis-garis gaya listrik untuk
a) dua muatan positif;
b) muatan positif dan negatif

Kerapatan garis-garis gaya listrik menggambarkan besarnya kuat medan listrik. Apabila dalam suatu ruang terdapat dua buah benda bermuatan listrik yang sama besar, garis-garis gaya listriknya dapat digambarkan sebagai berikut.

Di sekitar muatan sumber q terdapat medan listrik sehingga muatan q yang diletakkan dalam pengaruh medan listrik ini mendapat gaya Coulomb. Muatan lain q_2 yang diletakkan dalam pengaruh medan listrik ini juga mendapat gaya Coulomb. Gaya Coulomb yang dialami oleh partikel bermuatan bergantung pada muatan partikel dan muatan sumber q . Oleh karena itu, untuk mengetahui efek medan listrik dari muatan sumber q , kita meletakkan suatu muatan uji dalam ruang di sekitar medan listrik tersebut. Kuat medan listrik (E) didefinisikan sebagai hasil bagi gaya Coulomb yang bekerja pada muatan uji dengan besar muatan uji tersebut (q')

Secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$E = \frac{F}{q'} \quad F = q' \cdot E$$

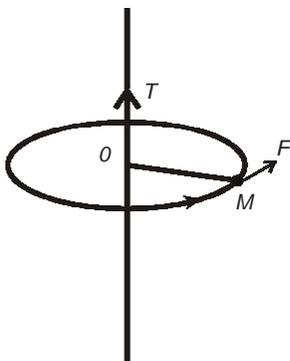
dengan:

E = kuat medan listrik yang dihasilkan oleh muatan sumber (N/C atau NC^{-1})

F = gaya Coulomb (N)

q' = muatan uji (C)

Persamaan kedua di atas menunjukkan muatan uji positif, vektor gaya Coulomb F searah dengan vektor kuat medan listrik E , dan untuk muatan uji negatif, vektor gaya Coulomb F berlawanan arah dengan vektor kuat medan listrik E .



Gambar 2.7

1. Kuat Medan Listrik Akibat Sebuah Muatan Titik

Berikut ini penurunan persamaan untuk menghitung kuat medan listrik di suatu sumber pada jarak tertentu dari sebuah sumber q . Besar gaya Coulomb antara muatan sumber q dan muatan uji q' adalah:

$$F = k \frac{q \cdot q'}{r^2}$$

Kuat medan listrik adalah hasil bagi gaya Coulomb dengan muatan uji

$$E = \frac{F}{q'}$$

$$F = q' \cdot E$$

$$E = k \frac{q}{r^2} \quad \text{atau dapat ditulis} \quad E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{q}{r^2}$$

dengan:

r = jarak titik terhadap muatan sumber (m)

q = muatan sumber (C)

E = besar kuat medan listrik (N/C)

Berikut ini adalah hal-hal yang perlu diperhatikan untuk menggambar vektor kuat medan listrik di suatu titik adalah:

- vektor E menjauhi muatan sumber positif dan mendekati sumber negatif;
- vektor E memiliki garis kerja sepanjang garis hubung antara muatan sumber dengan titik yang akan dilukis vektor kuat medannya.

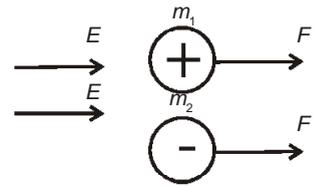
Vektor kuat medan listrik menjauhi muatan sumber positif

Vektor kuat medan listrik mendekati muatan sumber negatif

Kuat medan listrik diukur dalam N/C atau V/m (1 N/C = 1 V/m, akan dibuktikan kemudian). Kuat medan listrik dan medan magnet (ukuran radiasi elektromagnetik) yang melebihi ambang batas dapat membahayakan keehatan manusia. Rekomendasi badan kesehatan dunia WHO pada 1987 menyebutkan bahwa kuat medan listrik sampai 10^4 V/m atau 10^4 N/m tidak membahayakan kesehatan manusia. Sebagai pertimbangan untuk Anda mengetahui mana sumber medan listrik yang membahayakan kesehatan.

Tabel 2.1 Nilai Pendekatan Kuat Medan Listrik

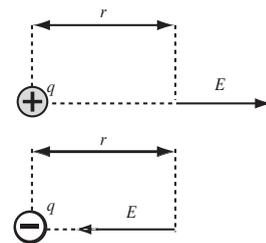
Medan Listrik	Nilai (N/C)
Kawat dalam rangkaian 120 V AC	10^2
Pada permukaan bumi	10^2
Dalam tabung gambar TV	10^5
Diperlukan untuk membuat percikan listrik di udara	3×10^6
Pada orbit elektron dalam atom hidrogen	5×10^{11}



Gambar 2.8

Perhatikan arah gaya coulomb F dan kuat medan E pada gambar.

- Untuk muatan uji positif, gaya coulomb F searah dengan kuat medan listrik E
- Adapun untuk muatan uji negatif gaya coulomb F berlawanan arah dengan kuat medan listrik E



Gambar 2.9

Gambar vektor kuat medan listrik

- menjauhi muatan sumber positif;
- mendekati muatan sumber negatif

Contoh Soal 2.4

Kuat medan listrik oleh muatan sumber titik

Hitung kuat medan listrik pada jarak 1 cm dari sebuah muatan positif 10^{-6} coulomb.

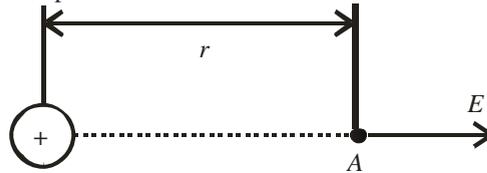
Penyelesaian:

Diketahui:

Muatan sumber $q = 10^{-6}$ C

Jarak titik A ke muatan sumber $r = 1$ cm = 10^{-2} m

Tetapan $k = 9 \times 10^9$ Nm²C⁻²



Arah kuat medan listrik E adalah menjauhi muatan sumber q .

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

Besar kuat medan listrik dihitung dengan persamaan

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

$$E = (9 \times 10^9) \frac{(10^{-6})}{(10^{-2})^2} = 9 \times 10^7 \text{ N/C}$$

Kuat medan listrik dan gaya Coulomb

Sebuah muatan uji 3×10^{-5} C diletakkan dalam suatu medan listrik. Gaya yang bekerja pada muatan uji tersebut adalah 0,45 N pada sudut 20° terhadap x positif. Berapa besar kuat medan listrik dan arahnya pada lokasi muatan uji?

Penyelesaian:

Diketahui:

muatan uji $q' = 3 \times 10^{-5}$ C

$F = 0,45$ N pada 20°

Kuat medan listrik E dihitung dengan persamaan

$$E = \frac{F}{q'}$$

$$E = \frac{0,45}{3 \times 10^{-5}}$$

$$E = 1,5 \times 10^4 \text{ N/C pada } 20^\circ$$

Jika muatan uji negatif, kuat medan listrik akan memiliki arah yang berlawanan yaitu

$$E = 1,5 \times 10^4 \text{ N/C pada } 20^\circ$$

2. Kuat Medan Listrik Di Suatu Titik Akibat Beberapa Muatan

Kuat medan listrik termasuk besaran vektor. Oleh karena itu, seperti halnya Coulomb yang telah dibahas. Kuat medan listrik di suatu titik akibat beberapa muatan sumber adalah jumlah vektor (resultan) dari vektor-vektor kuat medan listrik yang dihasilkan oleh setiap muatan sumber pada titik tersebut. Misalkan ada tiga buah muatan sumber q_1 , q_2 , dan q_3 masing-masing menghasilkan kuat medan listrik E_1 , E_2 , dan E_3 pada titik P maka kuat medan listrik di titik P (diberi lambang E_p) adalah resultan dari ketiga vektor medan listrik.

Secara matematis persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

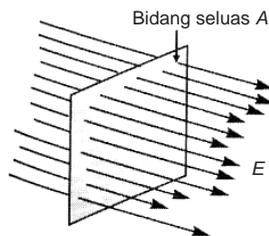
$$E_p = E_1 + E_2 + E_3$$

C. Hukum Gauss

Bagaimana cara menentukan kuat medan listrik akibat suatu distribusi muatan yang tersebar dalam suatu benda, misalnya bola? Untuk menentukan kuat medan listrik akibat distribusi muatan tertentu, Anda dapat menggunakan Hukum Gauss.

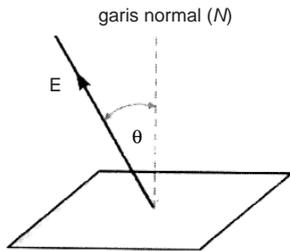
1. Fluks Listrik

Fluks listrik ialah jumlah garis medan yang menembus tegak lurus suatu bidang.



Gambar 2.10

Garis-garis gaya dari medan listrik homogen yang menembus tegak lurus suatu bidang seluas A.



Gambar 2.11

Garis-garis gaya dari suatu medan listrik homogen yang menembus bidang tidak tegak lurus

Perhatikan gambar berikut.

Garis-garis medan menembus tegak lurus suatu bidang segiempat seluas A . Jumlah garis-garis medan per satuan luas sebanding dengan kuat medan listrik sehingga jumlah garis medan yang menembus bidang seluas A sebanding dengan EA . Hasil kali antara kuat medan listrik E dengan luas bidang A yang tegak lurus dengan medan listrik tersebut dinamakan fluks listrik Φ .

Secara matematis persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

$$\Phi = E \times A$$

dengan:

E = kuat medan listrik (N/C)

A = luas bidang yang ditembus medan listrik (m^2)

Φ = fluks listrik ($NC^{-1}m^2$ atau weber (Wb))

$$1 \text{ weber} = 1 \text{ N C}^{-1} \text{ m}^2$$

Jika, medan listrik menembus bidang tidak secara tegak lurus, bagaimana persamaan fluks listriknya?

$$\Phi = E \times A'$$

Hubungan luas A' dan luas A adalah $A' = A \cos \theta$ sehingga persamaan fluks listrik untuk medan listrik yang menembus bidang tidak secara tegak lurus adalah:

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

Keterangan:

Φ = fluks listrik (weber = W)

E = kuat medan listrik (N/C)

A = luas bidang yang ditembus oleh medan listrik (m^2)

θ = sudut antara E dan garis normal bidang

Contoh Soal 2.5

Hitung jumlah garis medan yang menembus suatu bidang persegi panjang yang panjangnya 30 cm dan lebarnya 20 cm. Apabila kuat medan listrik homogen sebesar 200 N/C dan arahnya:

- searah dengan bidang;
- membentuk sudut 30° terhadap bidang;
- tegak lurus terhadap bidang.

Penyelesaian:

Untuk menentukan jumlah garis medan yang menembus bidang:

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

$\theta = 90^\circ \Rightarrow \cos\theta = \cos 90^\circ$, sehingga

$$\Phi = E.A \cos\theta = E.A(0)$$

a. $\Phi = 0$

b.

$\theta = 60^\circ \Rightarrow \cos\theta = \cos 60^\circ = \frac{1}{2}$, sehingga

$$\Phi = E.A \cos\theta = E.A\left(\frac{1}{2}\right)$$

$$\Phi = (200)(600 \times 10^{-4})\left(\frac{1}{2}\right) = 6 \text{ weber}$$

c.

$\theta = 0^\circ \Rightarrow \cos\theta = \cos 0^\circ = 1$, sehingga

$$\Phi = E.A \cos\theta = E.A(1)$$

$$\Phi = (200)(600 \times 10^{-4})(1) = 12 \text{ weber}$$

1. Kuat Medan Listrik pada Konduktor dan Keping Sejajar

Bagaimana menentukan kuat medan listrik pada konduktor dan keping sejajar? Konduktor merupakan bahan yang dapat menghantarkan arus listrik. Dalam konduktor tentunya terdapat muatan-muatan listrik. Misalkan luas tiap keping A dan masing-masing keping diberi muatan sama, tetapi berlawanan jenis $+q$ dan $-q$. Kita definisikan rapat muatan listrik σ , sebagai muatan per satuan luas:

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

Jumlah gaya yang menembus keping adalah:

$$\Phi = E.A \cos\theta = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Oleh karena medan listrik E menembus keping secara tegak lurus. Maka, $\theta = 0^\circ$ dan $\cos\theta = \cos 0^\circ = 1$ sehingga

persamaan di atas menjadi:

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

$$E = \left(\frac{q}{A}\right) \cdot \frac{1}{\epsilon_0}$$

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

dengan:

E = kuat medan listrik pada konduktor dua keping sejajar (N/C)

σ = rapat muatan keping (C/m²)

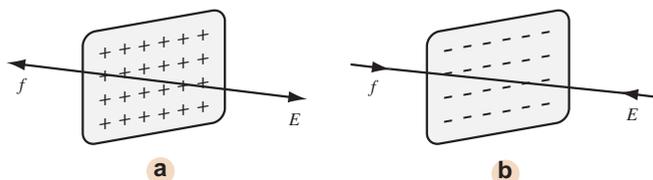
ϵ_0 = permisivitas udara = $8,85 \times 10^{-12}$ C² N⁻¹m⁻²

Gambar 2.12

dua buah pusat konduktor tipis

a) bermuatan positif

b) bermuatan negatif



Contoh Soal 2.6

Konduktor pelat sejajar yang setiap pelatnya berbentuk empat persegi panjang (panjang = 5 cm dan lebar = 2 cm) diberi masing-masing muatan $8,85 \mu\text{C}$ yang berlawanan jenis. Tentukanlah:

- rapat muatan listrik masing-masing pelat;
- kuat medan listrik di antara kedua pelat.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$p = 5 \text{ cm} = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$q = 8,85 \mu\text{C} = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}$$

$$l = 2 \text{ cm} = 2 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$A = pl = (0,05) = 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{a. } \sigma = \frac{q}{A} = \frac{8,85 \times 10^{-12}}{10^{-3}} = 8,85 \times 10^{-3} \text{ C/m}^2$$

$$\text{b. } E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{8,85 \times 10^{-3}}{8,85 \times 10^{-12}} = 10^9 \text{ N/C}$$

3. Kuat Medan Listrik pada Konduktor Bola Berongga

Apabila konduktor bola berongga diberi muatan maka itu tersebar merata di permukaan bola (dalam bola itu sendiri tidak ada muatan). Bagaimana kuat medan listrik dalam bola pada kulit bola dan luar bola? Kita akan menghitungnya dengan menggunakan hukum Gauss.

Kita buat permukaan I Gauss dalam bola ($r < R$). Muatan yang dilingkupi oleh permukaan sama dengan nol sebab dalam bola tidak ada muatan ($q = 0$). Sesuai dengan persamaan

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

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

$$E = \frac{0}{A\epsilon_0} = 0$$

Jadi, dalam bola kuat medan listrik sama dengan nol.

Sekarang, kita buat permukaan II Gauss di luar bola ($r > R$). Muatan yang dilingkupi oleh permukaan II ini sama dengan bola q . Kuat medan listrik di luar bola sesuai dengan persamaan

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

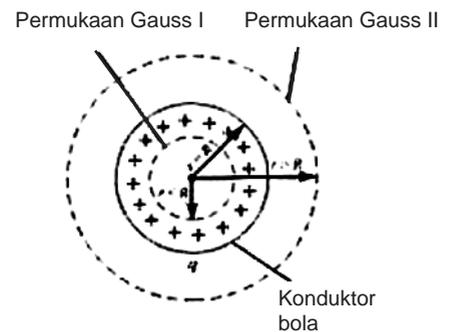
$$E = \frac{q}{A\epsilon_0}$$

Luas bola $A = 4\pi r^2$ sehingga

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

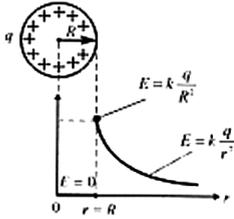
$$E = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{q}{\epsilon_0}$$

Kita dapat menyimpulkan bahwa kuat medan listrik untuk bola konduktor berongga yang diberi muatan adalah:



Gambar 2.13

Permukaan Gauss I dan II pada bola konduktor berongga bermuatan dengan r adalah jarak titik dari pusat bola



Dalam bola ($r < R$)

$$\Rightarrow E = 0$$

Kulit dan luar bola ($r > R$)

$$\Rightarrow E = k \frac{q}{r^2} = \frac{1}{4\pi r^2} \frac{q}{r^2}$$

Keterangan:

r adalah jarak titik dari pusat bola

Gambar 2.14 Contoh Soal 2.7

Grafik E terhadap r dari sebuah bola konduktor berongga

Kuat medan listrik pada konduktor bola berongga

Sebuah konduktor bola berongga diberi muatan sebesar $-50 \mu\text{C}$. Bola itu memiliki 12 cm. Hitung kuat medan listrik pada jarak.

- 3 cm dari pusat bola
- 6 cm dari pusat bola
- 9 cm dari pusat bola

Penyelesaian:

Diketahui:

Muatan konduktor $q = -50 \mu\text{C} = -50 \times 10^{-6} \mu\text{C}$

Jari-jari $R = \frac{1}{2} D = 6 \text{ cm} = 6 \times 10^{-2} \text{ m}$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$$

- Titik A terletak dalam bola sehingga sesuai dengan persamaan $E = 0$, kuat medan listrik di A sama dengan nol. Jadi, $E_A = 0$
- Titik B terletak pada kulit bola dan sesuai dengan persamaan

$$E_B = k \frac{q}{r_B^2}, \text{ dengan } r_B = 6 \text{ cm} = \text{m}$$

$$E_B = (9 \times 10^9) \frac{(-50 \times 10^{-6} \mu\text{C})}{(6 \times 10^{-2} \text{ m})^2}$$

$$E_B = -1,25 \times 10^8 \text{ N/C}$$

Tanda negatif menyatakan arah kuat medan listrik adalah radial ke dalam.

- Titik C terletak di luar bola dan sesuai dengan persamaan,

$$E_C = k \frac{q}{r_C^2} \text{ dengan } r_C = 9 \text{ cm} = \text{m}$$

$$E_B = (9 \times 10^9) \frac{(-50 \times 10^{-6} \mu\text{C})}{(9 \times 10^{-2} \text{ m})^2}$$

$$E_B = 5,6 \times 10^7 \text{ N/C}$$

D. Energi Potensial Listrik

Gaya Coulomb dan kuat medan listrik merupakan besaran vektor, sedangkan energi potensial listrik dan potensial listrik merupakan besaran skalar. Berikut ini Anda akan pelajari energi potensial dan potensial listrik.

1. Energi Potensial Listrik

Konsep mengenai energi potensial listrik serupa dengan penjelasan mengenai energi potensial akibat adanya medan gravitasi. Energi potensial listrik akan timbul apabila muatan uji q' didekatkan pada sebuah muatan q . Besarnya energi potensial yang timbul pada muatan q' sebanding dengan usaha yang diperlukan untuk melawan gaya F_c . Secara matematis dapat dituliskan perubahan energi potensial dari keadaan 1 ke keadaan 2 sebagai berikut.

$$\Delta E_p = -F_c \cos\theta \Delta S = W_{12}$$

dengan:

F_c = gaya Coulomb

ΔS = perpindahan muatan (m)

Tanda minus pada persamaan di atas berarti beda energi potensial sebanding dengan usaha untuk melawan gaya Coulomb F_c . Jadi, dibutuhkan gaya sebesar F untuk melawan gaya Coulomb F_c . Gaya tersebut didefinisikan sebagai berikut.

$$F = F_c$$

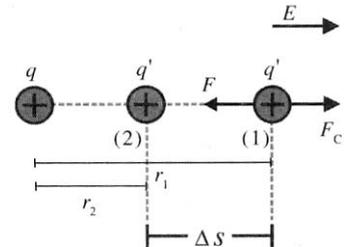
Pada gambar di atas dapat Anda lihat, bahwa gaya F sama dengan arah perpindahan ΔS sehingga $\cos\theta = 1$ ($\theta = 0$) maka $\Delta E_p = F\Delta S$. Untuk ΔS sangat kecil, $r_1 - r_2 \approx 0$ sehingga r_1 dapat dianggap sama dengan r_2 . Gaya F pada selang ΔS dapat dianggap sebagai rata-rata dari F_1 dan F_2 dengan \bar{F} adalah

$$\bar{F} = k \frac{q'q}{r_1 r_2}$$

Perubahan energi potensialnya adalah

$$\Delta E_p = W_{12} = F\Delta S$$

$$\bar{F} = k \frac{q'q}{r_1 r_2} (r_2 - r_1)$$



Gambar 2.15

Gambar muatan uji q' di pengaruhi oleh kuat medan E sehingga mendapat gaya coulomb

$$\Delta E_p = kq'q \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

dengan:

ΔE_p = beda energi potensial listrik antara kedudukan awal dan kedudukan akhir

W_{12} = usaha yang dilakukan gaya listrik

k = $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$

q' = muatan uji

q = muatan sumber

r_1 = jarak pisah muatan sumber dan muatan uji pada kedudukan akhir

r_2 = jarak pisah muatan sumber dan muatan uji pada kedudukan awal

Usaha yang dilakukan untuk memindahkan muatan uji q' sama dengan perubahan energi potensial muatan tersebut yaitu selisih antara energi potensial akhir (2) dan energi potensial awal (1).

Contoh Soal 2.8

Tentukan perubahan energi listrik ketika sebuah proton (muatan $= +e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$) digerakkan menuju ke sebuah inti Uranium yang bermuatan $1,47 \times 10^{-17} \text{ C}$. Jarak pisah awal kedua partikel adalah $+6 \times 10^{-11} \text{ m}$ dan jarak pisah akhirnya adalah $+200 \times 10^{-11} \text{ m}$.

Jawab:

Diketahui:

Muatan sumber adalah inti uranium $q = \text{C}$

Muatan uji adalah proton $q' = \text{C}$

Jarak pisah awal $r_1 = \text{m}$

Jarak pisah akhir $r_2 = \text{m}$

Perubahan energi listrik atau perubahan energi potensial listrik dihitung dengan persamaan

$$\Delta E_p = kq'q \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

$$\Delta E_p = (9 \times 10^9) (1,60 \times 10^{-19}) (1,47 \times 10^{-17})$$

$$\left(\frac{1}{+2,00 \times 10^{-11}} - \frac{1}{+6,00 \times 10^{-11}} \right)$$

$$\Delta E_p = 7,06 \times 10^{-16} \text{ J}$$

2. Potensial Listrik

a. Potensial Listrik oleh Sebuah Muatan Titik

$$\Delta E_p = kq'q \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

Apabila persamaan kedua ruasnya dibagi dengan muatan q' akan diperoleh:

$$\frac{\Delta E_p}{q'} = kq \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

Dari persamaan di atas, Anda akan mendapat sebuah besaran lain di sekitar sebuah muatan listrik. Besaran ini disebut potensial listrik.

Potensial listrik didefinisikan sebagai energi potensial listrik per satuan muatan sehingga beda potensial listrik antara dua titik 1 dan 2 adalah

$$V_{12} = \frac{\Delta E_p}{q'} = kq \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

Dalam sistem internasional satuan dari potensial listrik adalah joule per coulomb (JC^{-1}) yang diberi nama *volt*.

Untuk menentukan besarnya potensial listrik yang ditimbulkan oleh muatan q di titik (1) dan titik (2) adalah

$$V_{12} = kq \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)$$

$$V_{12} = \frac{kq}{r_2} - \frac{kq}{r_1}$$

atau $V_{12} = V_2 - V_1$ dengan

$$V_1 = \frac{kq}{r_1} \quad \text{dan} \quad V_2 = \frac{kq}{r_2}$$

Dengan V_2 menyatakan potensial mutlak di titik (1) dan V_1 menyatakan potensial mutlak di titik (2).

Secara umum potensial sebuah titik berjarak r dari muatan q adalah

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

Pada persamaan di atas tanda q harus diikutsertakan. Apabila q positif akan menimbulkan V positif, sedangkan untuk q negatif akan menimbulkan V negatif.

Potensial listrik di suatu titik pada medan listrik adalah besarnya usaha yang diperlukan untuk memindahkan satu satuan muatan listrik dari tidak berhingga ke titik tersebut.

Persamaan dapat ditulis kembali sebagai berikut.

$$W_{12} = q'(V_2 - V_1) = q'(V_2 - V_1) = q'(\Delta V)$$

b. Potensial Listrik oleh Beberapa Muatan Titik

Potensial listrik adalah besaran skalar (tidak memiliki arah) sehingga potensial listrik total di suatu titik akibat beberapa muatan lainnya merupakan penjumlahan aljabar biasa dari potensial listrik masing-masing muatan tersebut. Secara matematis persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

$$V = k \frac{q_1}{r_1} + k \frac{q_2}{r_2} + k \frac{q_3}{r_3} + \dots$$

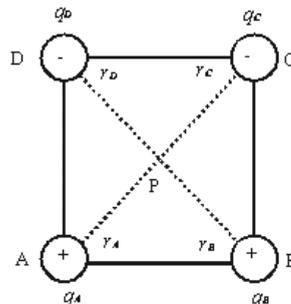
Contoh Soal 2.9

Pada keempat sudut bujursangkar (sisi = 30 cm) terdapat muatan listrik. Tentukanlah potensial listrik di titik pusat bujursangkar, apabila dua muatan yang bertetangga masing-masing besarnya $+2 \mu\text{C}$ dan yang lain $-2 \mu\text{C}$!

Jawaban:

Diketahui:

$$q_A = q_B = 2 \mu\text{C}; q_C = q_D = -2 \mu\text{C}; r_A = r_B = r_C = r_D$$



Oleh karena $q_A = q_B$ (muatan positif) dan $r_A = r_B$
 Di titik P: $V_A = V_B = +V$ (positif)
 Oleh karena $q_C = q_D$ (muatan negatif) dan $r_C = r_D$
 Di titik P: $V_C = V_D = -V$ (positif)
 $V_P = V_A + V_B + V_C + V_D = V + V - V - V = 0$ volt

c. Potensial Listrik pada Bola Konduktor Berongga

Anda telah mempelajari kuat medan listrik pada bola konduktor berongga, di mana kuat medan listrik E dalam bola sama dengan nol. Saat ini, Anda akan menganalisis proses pemindahan sebuah muatan q dari dalam bola (titik A) ke permukaan bola (titik B). Dalam proses tersebut, perpindahan ΔS kecil.

$$W_{A \rightarrow B} = F \cdot \Delta S = q \cdot E \cdot \Delta S$$

Perlu diketahui bahwa persamaan ini berlaku untuk $F = \text{konstan}$.

Oleh karena kuat medan listrik dalam bola sama dengan nol ($E = 0$). Sepanjang perpindahan dari A ke B, $W_{A \rightarrow B} = 0$ (sesuai definisi beda potensial: $V_A - V_B = V_{A \rightarrow B} = 0$). Hal ini berarti, potensial dalam bola konstan atau potensial dalam bola berongga atau potensial dalam bola berongga sama dengan potensial di permukaannya.

Potensial listrik dalam bola konduktor berongga sama dengan potensial di permukaan bola tersebut. Oleh karena potensial di seluruh ruang dalam konduktor bola berongga adalah sama, dapat dikatakan bahwa bidang dalam bola adalah bidang ekipotensial. Bidang ekipotensial adalah bidang tempat setiap titik pada bidang tersebut memiliki potensial listrik sama.

3. Hukum Kekekalan Energi Mekanik dalam Medan Listrik

a. Partikel Dipengaruhi oleh Potensial Listrik

Gerak partikel bermuatan (seperti proton dan elektron) dalam medan listrik dapat juga diselesaikan dengan menggunakan Hukum energi mekanik. Apabila gesekan-

gesekan diabaikan (misal ruang hampa) dan tidak ada gaya lain yang bekerja pada partikel bermuatan kecuali gaya Coulomb. Maka menurut hukum kekekalan energi mekanik

$$Ep + Ek = \text{tetap}$$

$$Ep_1 + Ek_1 = Ep_2 + Ek_2$$

Energi potensial listrik $Ep = qV$ dan energi kinetik

$$Ek = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{sehingga}$$

$$qV_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 = qV_2 + \frac{1}{2}mv_2^2$$

Contoh Soal 2.10

Potensial di suatu titik yang berjarak r dari muatan Q adalah 600 V. Kuat medan di titik tersebut 400 N/C. Apabila $k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$, tentukanlah besar muatan Q !

Penyelesaian:

Diketahui:

$$V = 600 \text{ volt}$$

$$E = 400 \text{ N/C}$$

$$\text{Nm}^2\text{C}^{-2}$$

Substitusikan nilai $r = k \frac{Q}{V}$ ke dalam persamaan $E = k \frac{Q}{r^2}$ Sehingga

$$E = \frac{kQV^2}{k^2Q^2} = \frac{V^2}{kQ} \Rightarrow Q = \frac{V^2}{kE}$$

$$= \frac{(600\text{V})^2}{(9 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2})(400 \text{ NC}^{-2})} = 10^{-7} \text{ C}$$

$$E = \frac{kQV^2}{k^2Q^2} = \frac{V^2}{kQ} \Rightarrow$$

$$Q = \frac{V^2}{kE} = \frac{(600\text{V})^2}{(9 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2})(400 \text{ NC}^{-2})} = 10^{-7} \text{ C}$$

b. Partikel Potensial di Antara Dua Pelat Sejajar

Bagaimana menentukan beda potensial V di antara dua pelat sejajar?

Gambar di atas menunjukkan dua pelat konduktor sejajar yang luas setiap pelatnya A dan terpisah sejauh d dengan kuat medan listrik di antara pelat E . Beda potensial V antara kedua pelat sejajar tersebut dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan usaha.

Usaha yang diperlukan untuk memindahkan sebuah muatan q dari pelat bermuatan negatif ke pelat bermuatan positif adalah

$$W_{12} = q(V_2 - V_1)$$

Usaha untuk memindahkan muatan q sejauh d dengan gaya F adalah

$$W_{12} = Fd$$

dengan $F = qE$ sehingga $W_{12} = qEd$

Dari kedua persamaan usaha tersebut diperoleh $q(V_2 - V_1) = qEd$ atau $V_2 - V_1 = Ed$

Beda potensial $V_2 - V_1$ ini dapat ditulis sebagai beda potensial V antara kedua pelat.

$$V = Ed \Rightarrow E = \frac{V}{d}$$

Jadi,

E. Kapasitor

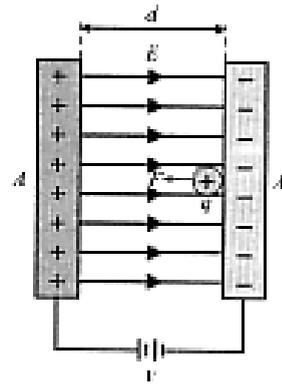
1. Mengenal Kapasitor

Kapasitor adalah komponen listrik yang digunakan untuk menyimpan muatan listrik. Secara prinsip, kapasitor terdiri dari dua konduktor yang dipisahkan oleh bahan penyekat (disebut juga bahan dielektrik).

Kedua konduktor itu diberi muatan sama besar, tetapi berlawanan tanda (yang satu bermuatan $+$, lainnya bermuatan $-$). Kemampuan kapasitor menyimpan muatan dinyatakan oleh besaran kapasitas (kapasitansi) yang umumnya diukur dalam satuan mikrofaraad (μF) atau pikofaraad (pF).

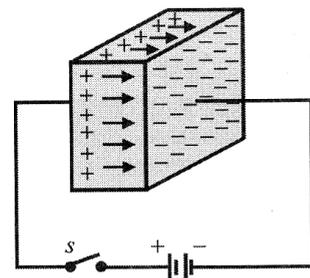
$$1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$$

$$1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$$



Gambar 2.16

konduktor dua plat sejajar



Gambar 2.17

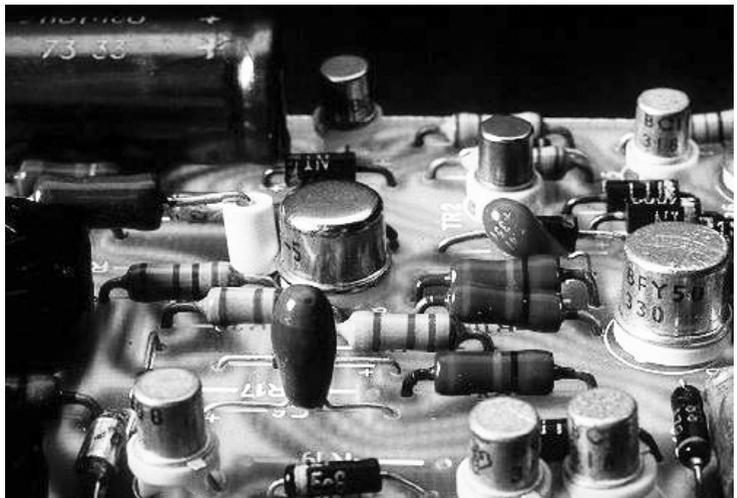
Gaya elektrostatik antara dua pelat konduktor yang muatannya tidak sejenis

$$1 \mu\text{F} = 1.000.000 \text{ pF}$$

Beberapa penggunaan kapasitor dalam berbagai fungsi kapasitor dalam berbagai rangkaian listrik adalah sebagai berikut.

- a. untuk memilih frekuensi pada radio penerima;
- b. sebagai filter dalam catu daya (*power supply*);
- c. untuk menghilangkan bunga api pada sistem pengapian mobil;
- d. sebagai penyimpan energi dalam rangkaian penyalah elektronik.

Kapasitor terdiri dari berbagai bentuk, ukuran, dan jenis disesuaikan dengan penggunaannya dalam praktek. Berikut ini dibahas tiga jenis kapasitor yang sering digunakan dalam praktek, yaitu kapasitor kertas, kapasitor elektrolit, dan kapasitor variabel.



Gambar 2.18

Berbagai jenis kapasitor

Sumber: CD Encarta, 2004

a. Kapasitor Kertas

Kapasitor kertas terdiri dari dua lembar kertas timah panjang yang berfungsi sebagai pelat-pelat konduktor. Kertas timah ini digulung pada sebuah silinder yang diantaranya diberi penyekat kertas. Jadi, kertas berfungsi sebagai bahan penyekat di antara kedua pelat. Kapasitor jenis ini memiliki kapasitansi sebesar $0,1 \mu\text{F}$.

b. Kapasitor Elektrolit

Kapasitor elektrolit terdiri dari dua lembar kertas aluminium

(sebagai pelat konduktor) dan aluminium oksida yang diproses secara kimia sebagai bahan penyekat. Satu pelat konduktor diberi tanda + dan pelat ini harus diberi muatan positif. Apabila diberi muatan negatif maka bahan penyekatnya akan rusak. Kapasitor jenis ini memiliki kapasitas paling tinggi (sampai 100.000 pF).

c. Kapasitor Variabel

Kapasitor variabel digunakan untuk memilih frekuensi gelombang pada radio penerima. Kapasitor ini memiliki dua kumpulan pelat-pelat logam paralel (sebagai pelat konduktor) yang dipisahkan oleh udara (udara sebagai bahan penyekat). Kumpulan pelat yang satu ditahan tetap (agar tidak dapat bergerak) dan kumpulan pelat lainnya dapat diputar sehingga nilai kapasitansinya dapat berubah. Nilai maksimum kapasitansinya sampai dengan 0,0005 μF (500 pF).

2. Kapasitor dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhinya

Kapasitor adalah komponen listrik yang digunakan untuk menyimpan muatan listrik dan kemampuannya untuk menyimpan muatan listrik dinyatakan oleh besaran atau kapasitansi. Kapasitas (C) didefinisikan sebagai perbandingan antara muatan q yang tersimpan dalam kapasitor dan beda potensial antara kedua konduktornya V .

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

Oleh karena satuan muatan q adalah coulomb dan satuan beda potensial V adalah volt. Maka, satuan kapasitas adalah **coulomb/volt** diberi nama **farad** (F). Jadi,

$$1 \text{ farad} = 1 \text{ coulomb/volt}$$

Contoh Soal 2.11

Sebuah kapasitor dimuati oleh baterai 3 volt sehingga bermuatan $0,6 \mu\text{F}$. Tentukanlah:

- kapasitas kapasitor;
- muatan yang tersimpan dalam kapasitor apabila dimuati oleh baterai 12 volt.

Jawaban:

Diketahui:

$$V_1 = 3 \text{ volt}$$

$$q_1 = 0,6 \mu\text{C} = 0,6 \times 10^{-6} \text{ C}$$

$$C = \frac{q_1}{V_1} = \frac{(0,6 \times 10^{-6} \text{ C})}{3\text{V}} = 2 \times 10^{-7} \text{ F}$$

a.

$$C = \frac{q_1}{V_1}$$

$$q_1 = CV_2$$

$$q_1 = (2 \times 10^{-7} \text{ F})(12 \text{ V})$$

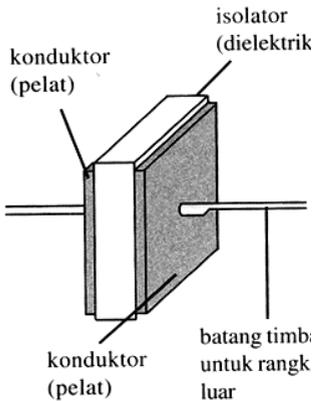
b. $q_1 = 2,4 \times 10^{-6} \text{ C}$ atau $q_2 = 4q_1$

Kapasitas kapasitor pada suatu medium tidak bergantung pada q maupun V . Dengan demikian, apabila V diperbesar n kali semula maka q akan menjadi n kali pula, sedangkan C tetap.

a. Kapasitas Kapasitor Pelat Sejajar

Perhatikan gambar berikut ini.

Gambar tersebut menunjukkan dua pelat konduktor yang disebut dengan kapasitor pelat sejajar. Apabila masing-masing pelat diberi muatan $+q$ dan $-q$, beda potensial kedua pelat V , luas tiap pelat A , dan jarak pisah kedua pelat d , kapasitas kapasitor pelat sejajar dapat diturunkan persamaannya.



Gambar 2.19

Kapasitor pelat sejajar dengan zat padat sebahai baham elektrik

$$E = \frac{q}{A\epsilon_0} \text{ dengan cara mensubstitusikan nilai } E = \frac{V}{d} \text{ dan}$$

$q = CV$ akan diperoleh sebagai berikut.

$$\frac{V}{d} = \frac{CV}{A\epsilon_0} \Rightarrow \frac{1}{d} = \frac{C}{A\epsilon_0}$$

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

sehingga

Keterangan:

C = kapasitas kapasitor pelat sejajar (farad)

ϵ_0 = permisivitas ruang hampa = $8,85 \times 10^{-12}$

A = luas setiap pelat (m^2)

d = jarak pisah kedua pelat (m)

b. Dielektrik

Dielektrik adalah bahan isolator yang memisahkan kedua pelat konduktor pada suatu kapasitor pelat sejajar. Kapasitor suatu kapasitor bergantung pada bahan dielektrik yang digunakan. Kapasitor yang menggunakan dielektrik kaca, mika, atau karet memiliki kapasitas yang lebih besar dibandingkan dengan kapasitor lain yang berukuran sama, tetapi menggunakan udara sebagai dielektriknya.

Efisiensi relatif suatu bahan sebagai dielektrik ditunjukkan oleh konstanta dielektrik (K) dan permisivitas bahan. Konstanta dielektrik suatu bahan didefinisikan sebagai perbandingan antara kapasitas kapasitor pelat sejajar yang menggunakan dielektrik dari bahan tersebut dan kapasitor pelat sejajar yang menggunakan udara sebagai dielektriknya. Secara matematis, persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

$$K = \frac{C'}{C} \text{ atau } C' = KC$$

dengan:

- K = konstanta dielektrik = $\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ atau disebut permisivitas relatif bahan = ϵ
- C' = kapasitas kapasitor yang menggunakan dielektrik dari bahan tertentu
- C = kapasitas kapasitor yang menggunakan dielektrik dari udara. Apabila di antara kedua pelat sejajar disisipkan

Tabel 2.2 Tabel Hasil Pengukuran Kuat Arus Listrik

Bahan	Konstanta Dielektrik, K
Vakum	1,0000
Udara (1 atm)	1,0006
Parafin	2,2
Polystyrene	2,6
Karet	6,7
Plastik	2-4
Kertas	3.7

Quartz	4,3
Minyak	4
Kaca	5
Porselen	6-8
Mika	7
Air	80

Apabila di antara kedua pelat sejajar disisipkan bahan dielektrik dengan permisivitas bahan ϵ , persamaannya dapat diubah menjadi

$$C' = \epsilon \frac{A}{d}$$

$$\epsilon = K\epsilon_0$$

Kapasitas kapasitor pelat sejajar bergantung pada dimensi kapasitor (luas pelat dan jarak pelat), serta bahan yang mengisi antara kedua pelat. Kapasitor tidak bergantung pada muatan yang tersimpan dalam kapasitor dan beda potensial antara kedua pelatnya.

Contoh Soal 2.12

Jarak pelat dalam suatu kapasitor pelat sejajar berisi udara 2 mm. Luas masing-masing pelat 200 cm². Pelat kapasitor diberi beda potensial 100 V. Kemudian, dilepaskan dari sumber tegangan dan ruang antara kedua pelat diisi oleh dielektrik dengan tetapan dielektrik 20. Tentukanlah:

- kapasitas kapasitor C sebelum diberi dielektrik;
- muatan q pada setiap pelat;
- kuat medan listrik E sebelum diberi dielektrik;
- kapasitas kapasitor C' setelah diberi dielektrik;
- permisivitas bahan dielektrik (ϵ);
- beda potensial pelat V' setelah diberi dielektrik;
- kuat medan listrik E' setelah diberi dielektrik.

Jawaban:

Diketahui:

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$$

$$V = 100 \text{ V}$$

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

$$K = 20$$

$$A = 200 \text{ cm}^2 = 2 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

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

$$= (8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}) \frac{(2 \times 10^{-2} \text{ m}^2)}{(2 \times 10^{-3} \text{ m})}$$

a. $= 8,85 \times 10^{-11} \text{ F}$

b. $q = CV = (8,85 \times 10^{-11} \text{ F})(100 \text{ V}) = 8,85 \times 10^{-9} \text{ C}$

c. $E = \frac{V}{d} = \frac{100 \text{ V}}{2 \times 10^{-3} \text{ m}} = 50.000 \text{ V/m}$

d. $C' = KC = (20)(8,85 \times 10^{-11} \text{ F}) = 1,77 \times 10^{-9} \text{ F}$

$$\epsilon = K\epsilon_0 = (20)(8,85 \times 10^{-12} \text{ F}) = 1,77 \times 10^{-10} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$$

e.

$$V' = \frac{q}{C'} = \frac{(8,85 \times 10^{-9} \text{ C})}{(1,77 \times 10^{-9} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2})} = 5 \text{ V}$$

f.

g. $E' = \frac{V'}{d} = \frac{5 \text{ V}}{2 \times 10^{-3} \text{ m}} = 2.500 \text{ Vm}^{-1}$

3. Susunan Kapasitor

Bagaimana mengukur pada kapasitor? Dua atau lebih kapasitor dapat disusun secara seri (berderet), paralel (sejajar), atau gabungan antara seri dan paralel.

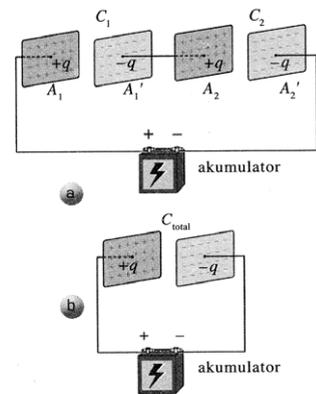
a. Susunan Seri Kapasitor

Dua kapasitor yang disusun seperti gambar berikut dinamakan susunan seri.

Kita dapat mengganti dua buah kapasitor itu dengan sebuah kapasitor pengganti yang memiliki kapasitas C_s . Pada susunan seri kapasitor berlaku:

- 1) Muatan pada tiap-tiap kapasitor adalah sama yaitu sama dengan muatan pada kapasitor pengganti. $q = q_1 = q_2$
- 2) Beda potensial pada ujung-ujung kapasitor pengganti sama dengan jumlah beda potensial ujung-ujung tiap-tiap kapasitor. $V = V_1 + V_2$

Perhatikan **gambar (a)** dengan menggunakan persamaan



Gambar 2.20

- a. Dua kapasitor pelat sejajar C_1 dan C_2 disusun seri
- b. Kapasitor pengganti (...) dari C_1 dan C_2 disusun seri

$$C = \frac{q}{V}. \text{ Maka, kita akan memperoleh}$$

$$C_1 = \frac{q}{V_1} \Leftrightarrow V_1 = \frac{q}{C_1}$$

$$C_2 = \frac{q}{V_2} \Leftrightarrow V_2 = \frac{q}{C_2}$$

Perhatikan **gambar (b)** Dengan menggunakan persa-

maan $C = \frac{q}{V}$. Maka, kita akan memperoleh

$$C_s = \frac{q}{V} \Leftrightarrow V = \frac{q}{C_s}$$

Dengan memasukkna nilai V , V_1 , dan V_2 ke dalam persamaan $V = V_1 + V_2$. Maka, kita akan memperoleh persamaan:

$$\frac{q}{C_s} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2}$$

Apabila kedua persamaan dibagi dengan q . Maka,

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Apabila kita kembangkan susunan seri dengan tiga atau lebih kapasitor maka kapasitas pengganti susunan seri dapat dibuat persamaannya sebagai berikut.

$$\frac{1}{C_s} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Secara umum, kapasitas kapasitor pengganti dari kapasitor-kapasitor yang disusun secara seri dapat dibuat persamaannya sebagai berikut.

$$q_{total} = q_1 = q_2 = q_3 = \dots$$

$$V_{total} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

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

Jadi, kapasitas pengganti susunan seri beberapa buah kapasitor selalu lebih kecil daripada kapasitas tiap-tiap kapasitor. Ini berarti, untuk mendapat kapasitas terkecil maka kapasitas kapasitor disusun seri.

b. Susunan Pararel Kapasitor

Dua kapasitor yang disusun pada **gambar (a)** berikut ini disebut susunan pararel.

Kiat dapat mengganti dua buah kapasitor itu dengan sebuah kapasitor pengganti yang memiliki kapasitas C_p . Pada susunan pararel kapasitor berlaku:

Pada susunan pararel kapasitor berlaku:

- 1) Beda potensial tiap-tiap kapasitor sama, dan bernilai sama dengan potensial sumber. $V = V_1 + V_2$
- 2) Muatan kapasitor sama dengan jumlah muatan tiap-tiap kapasitor. $q = q_1 + q_2$

Perhatikan gambar (b) berikut! Dengan menggunakan persamaan

$$C_1 = \frac{q_1}{V} \Leftrightarrow q_1 = C_1 V$$

$$C_2 = \frac{q_2}{V} \Leftrightarrow q_2 = C_2 V$$

Perhatikan pula gambar (c). Beda potensial ujung-ujung kapasitor pengganti juga V sehingga kita peroleh:

$$C_p = \frac{q}{V} \Leftrightarrow q = C_p V$$

Dengan cara memasukkan nilai q , q_1 , dan q_2 ke dalam persamaan $V = V_1 + V_2$. Maka, kita akan memperoleh persamaan:

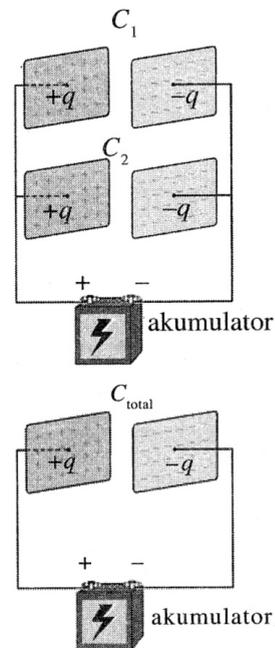
$$C_p = C_1 V + C_2 V$$

Apabila kedua persamaan dibagi dengan V .

$$\text{Maka, } C_p = C_1 + C_2$$

Apabila kita kembangkan susunan pararel dengan tiga atau lebih kapasitor maka kapasitas pengganti pararel dapat dibuat persamaannya berikut ini.

$$C_p = \sum_{i=1}^{i=n} C_i = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$



Gambar 2.21

- a. Dua kapasitor plat sejajar C_1 dan C_2 disusun pararel
- b. Kapasitor pengganti (C_{total}) dari C_1 dan C_2 disusun pararel

Jadi, kapasitas pengganti susunan paralel dengan tiga buah kapasitor selalu lebih besar daripada kapasitas tiap-tiap kapasitor. Ini berarti, untuk mendapat kapasitas terbesar maka kapasitor-kapasitor disusun paralel.

Secara umum, kapasitas kapasitor pengganti dari kapasitor-kapasitor yang disusun secara paralel dapat ditulis persamaannya sebagai berikut.

$$q_{total} = q_1 + q_2 + q_3 + \dots$$

$$V_{total} = V_1 = V_2 = V_3 = \dots$$

$$C_{total} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

4. Energi yang Tersimpan dalam Kapasitor

Sebuah kapasitor yang bermuatan memiliki energi potensial yang tersimpan di dalamnya. Apabila salah satu muatannya kita bebaskan mulai dari keadaan diam dari satu keping ke keping lainnya maka energi potensialnya semakin besar selama muatan itu berpindah. Kita akan menghitung berapa banyak energi yang tersimpan dalam kapasitor.

Perhatikan sebuah kapasitor keping sejajar yang mula-mula tidak bermuatan sehingga beda potensial awal antara kedua keping nol. Sekarang bayangkan bahwa kapasitor dihubungkan ke baterai untuk memberi muatan maksimum q . Kita anggap sedikit demi sedikit muatan dipindahkan dari salah satu keping ke keping yang lain. Setelah muatan q dipindahkan, beda potensial akhir antara kedua keping

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

ialah $\frac{q}{C}$. Beda potensial awal adalah nol sehingga beda potensial rata-rata (\bar{V}) selama proses pemindahan muatan ini adalah

$$\bar{V} = \frac{0 + V}{2} = \frac{0 + \frac{q}{C}}{2} \Leftrightarrow \bar{V} = \frac{q}{2C}$$

Usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan q adalah hasil kali beda potensial rata-rata dengan muatan yang sudah dipindahkan:

$$W = q\bar{V}$$

$$W = q\left(\frac{q}{2C}\right) = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$$

$$W = \frac{1}{2} \frac{(CV)^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2$$

Oleh karena $q = CV$ maka

$$W = \frac{1}{2} \frac{q^2}{\left(\frac{q}{V}\right)} = \frac{1}{2} qV$$

Oleh karena $C = \frac{q}{V}$ maka

Secara lengkap persamaan energi yang tersimpan dalam kapasitor (energi potensial) adalah:

$$W = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} = \frac{1}{2} qV = \frac{1}{2} CV^2$$

Contoh Soal 2.13

Dua kapasitor $3 \mu\text{F}$ dan $5 \mu\text{F}$ disusun seri dan beda potensial 110 V dipasang pada rangkaian ini. Hitung energi yang tersimpan dalam sistem.

Jawaban:

Mula-mula kita hitung kapasitas pengganti susunan seri dengan persamaan

$$C_s = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$C_s = \frac{(3 \mu\text{F})(5 \mu\text{F})}{(3 \mu\text{F}) + (5 \mu\text{F})}$$

$$C_s = \frac{15}{8} \mu\text{F}$$

Kemudian, energi yang tersimpan dalam sistem dihitung dengan persamaan

$$W = \frac{1}{2} C_s V^2$$

$$W = \frac{1}{2} \left(\frac{15}{8} \mu\text{F}\right) (110 \text{ V})^2$$

$$W = \frac{1}{2} \left(\frac{15}{8} \times 10^{-6} \text{ F}\right) (110 \text{ V})^2 = 0,11 \text{ J}$$

Ringkasan

Listrik statis mempelajari tentang muatan listrik yang berada dalam keadaan diam.

Atom terdiri atas inti yang bermuatan positif dan dikelilingi oleh elektron-elektron yang bermuatan negatif. Di dalam inti atom terdapat proton yang bermuatan positif dan Neutron yang tidak bermuatan (netral). Suatu benda dikatakan bermuatan listrik negatif, jika benda tersebut kelebihan elektron. Adapun benda dikatakan bermuatan listrik positif, jika benda tersebut kekurangan elektron. Benda netral adalah benda yang jumlah muatan positifnya sama dengan jumlah muatan negatifnya..

Gaya Coulomb adalah gaya tarik-menarik atau tolak-menolak antar-dua muatan listrik

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

Medan listrik adalah ruang di sekitar benda bermuatan listrik tempat benda-benda bermuatan listrik lainnya akan mengalami gaya listrik. Besarnya kuat medan listrik (E) di definisikan sebagai hasil bagi antara gaya Coulomb (F) yang bekerja pada muatan uji dan besarnya muatan uji tersebut (q').

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

Kuat medan listrik di dalam konduktor bola berongga berjari-jari R adalah

$$E = 0; \text{ untuk } r < R$$

$$E = k \frac{q}{R^2}; \text{ untuk } r = R$$

$$E = k \frac{q}{r^2}; \text{ untuk } r > R$$

Potensial listrik akibat sebuah muatan titik adalah energi potensial per satuan muatan di titik tersebut.

$$V = \frac{Ep}{q} = k \frac{q}{r}$$

Potensial listrik di dalam konduktor bola berongga yang berjari-jari R .

$$V = k \frac{q}{R}; \text{ untuk } r < R$$

$$V = k \frac{q}{r}; \text{ untuk } r > R$$

Kapasitansi kapasitor adalah kemampuan suatu kapasitor untuk memperoleh dan menyimpan muatan listrik.

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

Konstanta dielektrik suatu bahan dapat didefinisikan sebagai perbandingan antara kapasitas kapasitor pelat sejajar yang menggunakan dielektrik dari bahan tersebut dan kapasitor pelat sejajar yang menggunakan udara sebagai dielektriknya.

$$K = \frac{C'}{C} \text{ atau } C' = kC$$

Kapasitas kapasitor didefinisikan sebagai perbandingan tetap antara muatan q yang tersimpan dalam kapasitor dan beda potensial antara kedua konduktornya V .

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

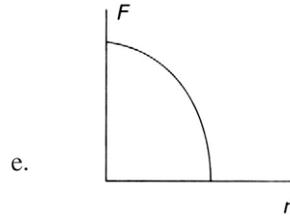
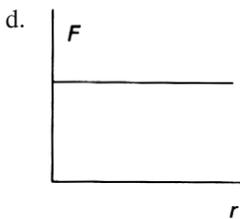
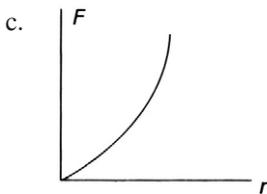
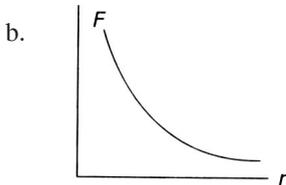
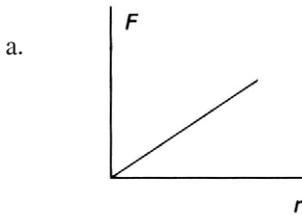
Energi yang tersimpan pada kapasitor.

$$W = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} qV = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$$

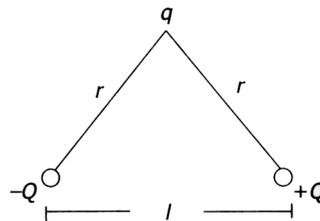
Tes Kompetensi Bab 2

A. Pilihlah satu jawaban yang benar

1. Dua buah benda bermuatan $+q_1$ dan $+q_2$ berjarak r satu sama lain. Jika jarak r diubah-ubah maka grafik yang menyatakan hubungan gaya interaksi keada muatan F dengan r adalah



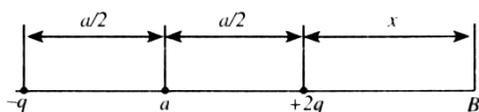
2. Muatan A menolak muatan B dan menarik muatan c, sedangkan muatan C menolak muatan D. Jika C bermuatan positif
- muatan A positif
 - muatan b positif
 - muatan A negatif
 - muatan D negatif
 - muatan netral
3. Perhatikan gambar berikut ini.



Resultan gaya F yang bekerja pada muatan q pada gambar adalah

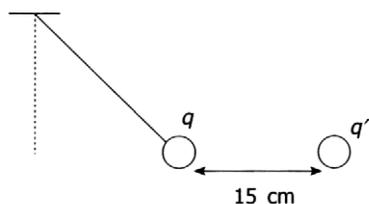
- a.
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q(Ql)}{r^3}$$
- b.
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q(Ql^2)}{r^4}$$
- c.
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{l r}$$
- d.
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2}$$
- e.
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{l^3}$$

4. Tiga buah muatan yang sama terletak pada sudut-sudut segitiga sama sisi. Jika gaya antara dua muatan besarnya F , besarnya gaya total pada setiap muatan adalah
- $F\sqrt{2}$
 - $2F$
 - $2\sqrt{F}$
 - $F\sqrt{3}$
 - nol
5. Perhatikan gambar berikut.



Pada gambar di atas dua muatan titik $-q$ dan $+2q$ terpisah sejauh a . Titik A berada di tengah-tengah garis penghubung kedua muatan tersebut dan titik B berada sejauh x dari muatan $+2q$. Agar potensial listrik di A sama dengan potensial di B maka nilai x kira-kira adalah

- $0,2a$
 - $0,38a$
 - $0,52a$
 - $0,64a$
 - $0,78a$
6. Suatu segitiga samasisi yang panjang sisinya 30 cm berada di udara. Jika di titik-titik sudut A, B, dan C berturut-turut terdapat muatan listrik sebesar $-2 \mu\text{C}$, 2C , dan 3C . Besarnya gaya Coulomb pada muatan di titik C adalah
- $0,6 \text{ N}$
 - $0,7 \text{ N}$
 - $0,8 \text{ N}$
 - $0,9 \text{ N}$
 - $1,0 \text{ N}$
7. Perhatikan gambar berikut ini.

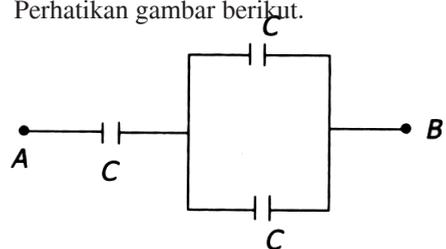


Sebuah benda bermassa 20 gram dan bermuatan $q = +0,5 \text{ C}$ digantung pada seutas tali ringan yang massanya dapat diabaikan. Tepat di sebelah kanan benda pada jarak 15 cm diletakkan muatan $q' = -1 \text{ C}$ yang menyebabkan posisi benda menjadi seperti

pada gambar. Jika $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, tegangan pada tali dekat pada harga

- $0,20 \text{ N}$
 - $0,24 \text{ N}$
 - $0,28 \text{ N}$
 - $0,32 \text{ N}$
 - $0,40 \text{ N}$
8. Banyaknya garis gaya tegak lurus pada bidang per satuan luas menggambarkan besarnya
- muatan listrik
 - potensial listrik
 - energi potensial listrik
 - kuat medan listrik
 - rapat muatan listrik
9. Segumpal awan memiliki potensial 8×10^6 volt terhadap bumi. Ketika terjadi kilat antara awan dan bumi suatu muatan listrik sebesar 40 C dilepaskan. Banyaknya energi yang hilang pada peristiwa itu adalah
- $5 \times 10^5 \text{ J}$
 - $2 \times 10^6 \text{ J}$
 - $5 \times 10^6 \text{ J}$
 - $1,6 \times 10^8 \text{ J}$
 - $3,2 \times 10^8 \text{ J}$
10. Dua titik A dan B berjarak 0,5 m satu sama lain (A di kiri B). Pada titik A dan B diletakkan muatan-muatan $q_A = -4 \text{ nC}$ dan $q_B = +9 \text{ nC}$. Letak titik C yang kuat medannya sama dengan nol adalah
- 1 m di kanan B
 - 1 m di kanan A
 - 1 m di kiri A
 - 0,25 m di kiri A
 - pertengahan AB

11. Kapasitansi suatu keeping sejajar yang bermuatan adalah
- berbanding lurus dengan besar muatannya
 - berbanding terbalik dengan beda potensial antara kedua kepingnya
 - makin besar jika jarak antara dua keeping diperbesar
 - makin besar apabila luas kedua keping diperbesar
 - tidak bergantung pada medium antara kedua keeping
12. Sebuah bola konduktor berongga bermuatan q dan jari-jari bola R . Kuat medan listrik karena pengaruh muatan bola akan memenuhi persamaan
- $E = k \frac{q}{r^2}; r < R$
 - $E = 0; r \geq R$
 - $E = k \frac{q}{r^2}; r \geq R$
 - $E = k \frac{q}{r^2}; r < R$
 - $E = 0; 2r < R < r$
13. Suatu muatan Q ditempatkan pada kapasitor c pada beda potensial V . tenaga potensial yang tersimpan pada kapasitor memiliki nilai
- $3C$
 - $1/3C$
 - $2C$
 - $2/3C$
 - $3/2C$
14. Sebuah electron yang mula-mula diam, bergerak melalui beda potensial 1000 V. Jika massa electron $1,9 \times 10^{-31}$ kg dan muatannya $-1,6 \times 10^{-19}$ C. Energi kinetic akhirnya adalah
- $1,0 \times 10^3$ J
 - $1,6 \times 10^{-16}$ J
 - $14,6 \times 10^{-50}$ J
 - $5,7 \times 10^{-24}$ J
 - $1,6 \times 10^{-31}$ J
15. Sebuah kapasitor diberi muatan 10 nC dan memiliki beda potensial 100 V antara pelat-pelatnya. Kapasitansinya dan tenaga yang tersimpan di dalamnya adalah
- 100 pF dan 5×10^{-5} J
 - 100 pF dan 5×10^{-7} J
 - 1 nF dan 5×10^{-7} J
 - 10 nF dan 6×10^{-7} J
 - 100 nF dan 2×10^{-7} J
16. Sebuah bola berjari-jari 20 cm memiliki muatan $+100$ C. Potensial listrik sebuah titik berjarak 30 cm dari permukaan bola tersebut adalah
- $1,8$ V
 - $1,8$ kV
 - $1,8$ MV
 - $1,8$ GV
 - $1,8$ TV
17. Kapasitor 2 mikrofarad yang berpotensi 15 V dihubungkan paralel dengan kapasitor 4 mikrofarad yang berpotensi 30 V dengan menghubungkan ujung-ujung yang bersamaan tanda muatannya. Maka, potensial gabungannya menjadi
- 45 V
 - 25 V
 - 15 V
 - $12,5$ V
 - 10 V
18. Sebuah kapasitor pelat sejajar yang ruang di antaranya berisi udara dan kapasitansinya C_0 dihubungkan dengan sumber tegangan V . Jika ruang antara kedua pelat kapasitor diisi dengan mika (sumber tegangan tidak dilepas), besaran yang tidak berubah adalah
- kapasitansinya
 - muatannya
 - kuat medannya
 - energinya
 - tidak ada
19. Perhatikan gambar berikut.



Tiga buah kapasitor yang kapasitansinya sama besar, yaitu C . Ketiga kapasitor ini dipasang seperti pada gambar. Maka, kapasitas pengganti antara titik A dan B adalah

- a. $3C$
- b. $1/3Ce$
- c. $2C$
- d. $2/3C$
- e. $3/2C$

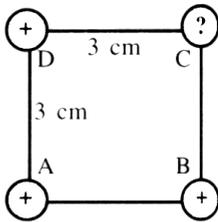
20. Dua kapasitor $C_1 = 1 \text{ F}$ dan $C_2 = 2 \text{ F}$ dirangkakan secara paralel, kemudian dihubungkan dengan beda potensial 6 V . Energi yang tersimpan pada masing-masing kapasitor adalah

- a. $6 \times 10^{-6} \text{ J}$ dan $12 \times 10^{-12} \text{ J}$
- b. $3 \times 10^{-6} \text{ J}$ dan $4 \times 10^{-12} \text{ J}$
- c. $3 \times 10^{-6} \text{ J}$ dan $8 \times 10^{-12} \text{ J}$
- d. $4 \times 10^{-6} \text{ J}$ dan $12 \times 10^{-12} \text{ J}$
- e. $4 \times 10^{-6} \text{ J}$ dan $8 \times 10^{-12} \text{ J}$

B. Soal Uraian

Jawablah pertanyaan-pertanyaan dibawah ini dengan benar.

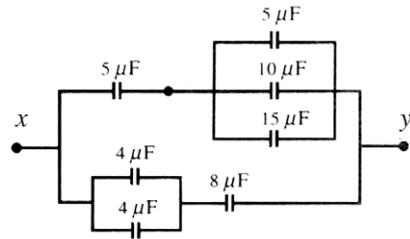
1. Dua muatan listrik $q_1 = 1 \mu\text{C}$ dan $q_2 = 2 \mu\text{C}$ berjarak d , menimbulkan gaya tolak-menolak sebesar F . Jika pada masing-masing muatan ditambahkan muatan listrik sebesar $1 \mu\text{C}$, agar gaya tolak-menolaknya tetap F , hitunglah jarak antara kedua muatan.
2. Perhatikan gambar berikut.



Muatan $q_A = q_B = q_C = 1 \mu\text{C}$. Keempat muatan berada di udara dengan $k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$. Agar gaya total yang dialami oleh muatan q_A adalah nol, tentukanlah jenis dan besar muatan q_C .

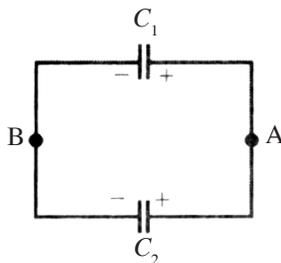
3. Sebuah electron ($m = 9 \times 10^{-31} \text{ kg}$ dan $q = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$) ditembakkan dengan kecepatan 5 km/s searah dengan kuat medan listrik sebesar 2 kV/m . Berapakah jarak terjauh yang dapat ditempuh electron tersebut sebelum berhenti?
4. Potensial pada sebuah titik yang berjarak 3 cm dari sebuah muatan titik yang berada di udara adalah v . Tentukanlah kuat medan listrik titik tersebut. ($k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$)

5. Perhatikan rangkaian berikut.

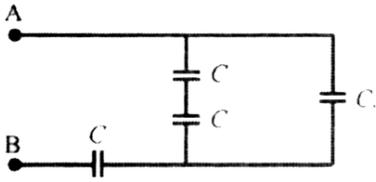


Hitunglah:

- a. kapasitas pengganti antara titik x dan titik y ;
 - b. beda potensial antara titik x dan titik z apabila muatan pada kapasitor $15 \mu\text{F}$ adalah $300 \mu\text{C}$.
6. Kapasitor $2 \mu\text{F}$ yang berpotensi 15 V dihubungkan paralel dengan kapasitor $4 \mu\text{F}$ yang berpotensi 30 V dengan menghubungkan ujung-ujung yang bersamaan tanda muatannya. Tentukan beda potensial V_{AB} setelah mencapai keseimbangan baru.

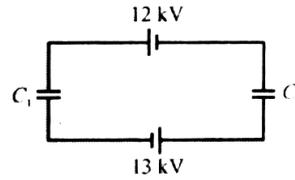


7. Hitunglah kapasitas pengganti antara A dan B.



8. Untuk menyimpan muatan 1 C digunakan kapasitor yang masing-masing berkapasitas $2,5\text{ F}$ dan dihubungkan paralel pada beda potensial 200 V . Hitunglah jumlah kapasitor yang diperlukan.

9. Hitunglah besarnya tegangan pada ujung-ujung C_1 , jika diketahui $C_1 = 3\ \mu\text{F}$ dan $C_2 = 7\ \mu\text{F}$.



10. Potensial suatu titik yang berjarak 8 cm dari pusat bola konduktor bermuatan yang memiliki diameter 12 cm adalah 90 V . Tentukanlah:
- muatan bola konduktor tersebut;
 - kuat medan listrik di titik yang berjarak 14 cm dari permukaan bola.

Kapasitansi Kapasitor dan Keyboard



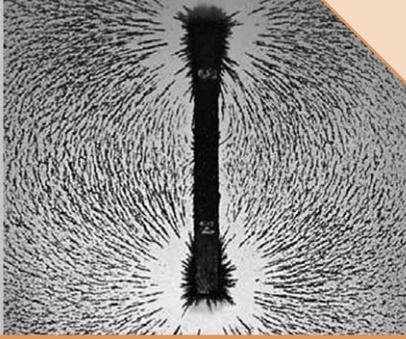
Tahukah kamu, sepuluh atau limabelas tahun yang lalu, kapasitansi sebesar $1 \mu\text{F}$ adalah hal biasa. Sekarang, ada kapasitor yang kapasitansinya sebesar 1 f atau 2 F . Secara fisik bentuknya akecil, hanya beberapa centimeter. Contohnya pad arangkaian power supply di computer atau VCR yang digunakan untuk mengatur waktu dan penanggalan. Kapasitor digunakan karena dapat mengganti peran baterai bahkan 10^5 kali lebih baik sehingga waktu dan tanggal

yang tertera tidak akan mengalami kesalahan. Bagimanakah cara membuat kapasitor dengan kapasitas besar?

Dengan menggunakan bahankarbon yang memiliki daya serap tinggi sehingga akan mengakibatkan luas pelat menjadi besar. Sepersepuluh gram karbon memiliki luas area 100 m^2 . Selanjutnya, terdapat muatan yang besarnya sama, tetapi berlawanan dimana muatan positif berada di pelat karbon dan muatan negative berada di pelat asam sulfur dengan jarak sekitar 10^{-9} sehingga besar kapasitansi dari $0,1 \text{ g}$ karbon adalah

$$C = \epsilon_0 = (8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}) \frac{(100 \text{ m}^2)}{(10^{-9})} = 0,885 \text{ F}$$

Perlu kamu ketahui juga bahwa keyboard pada computer menggunakan konsep kapasitansi kapasitor. Setiap tombol dihubungkan dengan pelat bagian atas kapasitor. Ketika pelat bagian atas ditekan mengakibatkan jarak kapasitor ini akan menjadi sinyal listrik sehingga akan terdeteksi oleh rangkaian listrik dalam computer.



Sumber: CD Image, 2004

Bab 3

Kemagnetan

Anda tentu sudah pernah mempelajari magnet. Kegunaan magnet banyak sekali dipergunakan dalam kehidupan sehari-hari, seperti magnet banyak dimanfaatkan sebagai kompas, alat-alat ukur listrik, telepon, relai, dinamo sepeda, dan sebagainya.

Pada bab ini kamu akan mempelajari gejala kemagnetan, sifat-sifat magnet, serta penggunaannya dalam kehidupan sehari-hari. Dalam materi bab ini juga kamu akan mempelajari hubungan antara kemagnetan dan listrik serta magnet yang ditimbulkan oleh arus listrik

Standar Kompetensi

Mempersiapkan konsep kelistrikan dan kemagnetan dalam berbagai penyelesaian masalah dan produk teknologi

Kompetensi Dasar

Menerapkan induksi magnetik dan gaya magnetik pada beberapa produk teknologi

- A. Pengertian Kemagnetan
- B. Medan Magnetik
- C. Gaya Magnet
- D. Gaya Gerak Listrik (GGL) Induksi

A. Pengertian Kemagnetan



Gambar 3.1

Manfaat magnet dalam kehidupan sehari-hari

Kata “magnet” diduga berasal dari kata “magnesia”, yaitu nama suatu daerah di Asia Kecil. Diperkirakan beberapa abad sebelum masehi di daerah itu ditemukan suatu jenis batuan yang memiliki sifat dapat menarik bahan besi atau baja. Diperkirakan orang Cina adalah kali pertama memanfaatkan batu bermuatan ini sebagai kompas, baik di darat maupun di laut. Selain itu, sekarang orang telah dapat membuat magnet dari bahan besi, baja, maupun campuran logam lainnya. Manfaat lain dari magnet adalah banyak dimanfaatkan alat-alat ukur listrik, telepon, relai, dinamo sepeda, dan sebagainya.

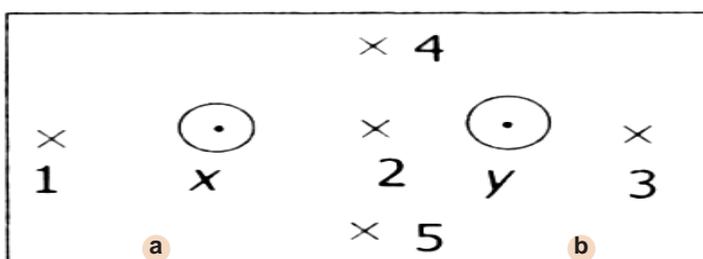
Seorang ahli matematika dan astronomi berkebangsaan Yunani, *Thales*, banyak menaruh perhatian pada magnet. Akan tetapi, kajian tentang magnet kali pertama dilakukan oleh **Sir William Gilbert (1544–1603)** dengan menerbitkan hasil kajiannya dalam buku *De Magnete*.

1. Sifat-Sifat Magnet

Apakah itu magnet? Samakah magnet dengan kemagnetan? Secara sederhana magnet adalah suatu benda yang memiliki gejala dan sifat dapat mempengaruhi bahan-bahan tertentu yang berada di sekitarnya. Gejala dan sifat yang dimiliki oleh magnet itulah yang disebut **kemagnetan**.

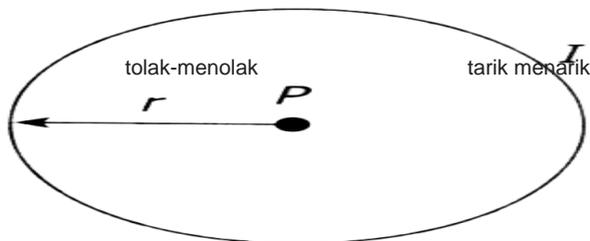
Gambar 3.2

- a) Benda yang memiliki sifat kemagnetan
- b) benda-benda yang tidak memiliki sifat kemagnetan



Sebuah magnet terdiri dari magnet-magnet kecil yang mengarah ke arah yang sama. Magnet-magnet kecil ini disebut **magnet elementer**. Pada logam yang bukan magnet, magnet elementernya memiliki arah sembarangan sehingga efeknya saling meniadakan yang mengakibatkan tidak adanya kutub-kutub di ujung logam.

Setiap magnet memiliki dua kutub magnet, yaitu kutub utara dan kutub selatan. Kekuatan sifat kamagnetan yang paling besar berada pada kutub magnet. Bagaimanakah sifat-sifat magnet? Selain memiliki sifat menarik logam tertentu, magnet juga memiliki sifat-sifat tertentu apabila kutub magnet yang satu berdekatan dengan kutub magnet



- Kutub-kutub magnet sejenis (kutub utara dengan kutub utara atau kutub selatan dengan kutub selatan) akan saling tolak-menolak.
- Kutub-kutub magnet tidak sejenis (kutub utara dengan kutub selatan atau kutub selatan dengan kutub utara) akan saling tarik-menarik.

Apa yang terjadi apabila sebuah magnet batang dipotong pada bagian tengahnya?

Bagian tengah magnet yang terpotong akan membentuk kutub-kutub magnet yang baru. Kemudian, apa yang terjadi apabila potongan magnet tadi dipotong lagi? Ternyata, potongan-potongan magnet tadi akan membentuk kutub-kutub magnet yang baru lagi. Jadi, sebuah magnet terdiri dari magnet-magnet kecil yang terletak berderet dari kutub utara menghadap ke arah kutub selatan magnet, dan sebaliknya kutub selatan menghadap ke arah kutub utara magnet. Magnet-magnet kecil tersebut dinamakan *domain* atau *magnet elementer*.

Sifat domain pada baja sulit diatur, berarti baja sukar dimagnetkan, tetapi apabila telah teratur sukar berubah, atau dikatakan sifat kemagnetan baja tetap. Pada besi, domainnya mudah diatur atau mudah dimagnetkan, tetapi juga mudah berubah atau sifat kemagnetannya sementara.

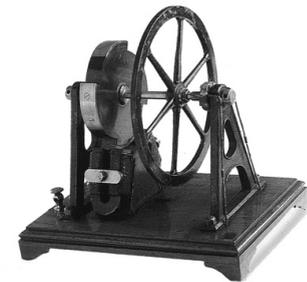
2. Bahan Magnetik dan Bahan Nonmagnetik

Apakah semua benda dapat dipengaruhi oleh magnet? Jika dapat, samakah pengaruh magnet pada setiap benda yang ada di sekitarnya?

Gambar 3.3

- Kutub magnet yang sejenis (tolak-menolak)
- Kutub magnet yang tidak sejenis (tarik-menarik)

Tahukah Anda?



Listrik dan Gerakan

Pada 1823, ilmuwan Inggris bernama **William Sturgeon** membuat magnet listrik pertama dengan melilitkan seutas kawat pada batang besi. Pada saat arus listrik mengalir pada kawat, batang besi menjadi magnet. Delapan tahun kemudian, ilmuwan Amerika Serikat **Joseph Henry** memakai efek ini untuk membuat motor listrik pertama.

Sumber: Buku Saku Penemuan, 1997

Fisikawan Kita



**Hans Christian Oersted
(1777-1851)**

Hans Christian Oersted lahir di kota terpencil Pulau Langeland, Denmark. Dia dan saudara laki-lakinya belajar secara mandiri dengan sangat baik sehingga dapat diterima di Universitas Copenhagen. Akhirnya, saudara laki-laki Oersted menjadi pengacara dan Oersted sendiri menjadi ahli fisika terkenal di Denmark.

Pada suatu hari, tahun 1820 ketika memberikan suatu kuliah, Oersted secara tidak sengaja meletakkan magnet jarum sejajar dan berimpit dengan kawat percobaan. Ketika arus listrik dialirkan pada kawat, ternyata magnet jarum menyimpang dari kedudukan semula. Kemudian, setelah meneliti lebih lanjut, akhirnya Oersted menyimpulkan bahwa di sekitar arus listrik timbul medan magnet atau kawat berarus listrik dapat menimbulkan medan magnet di sekitarnya. Penemuan ini mengilhami sejumlah penelitian tentang kelistrikan dan kemagnetan oleh ilmuwan-ilmuwan terkenal seperti Andre Marie Ampere (Prancis) dan Michael Faraday (Inggris).

Sumber: Tokoh-Tokoh Terkenal Ilmuwan, 2000

ketika sebuah magnet tetap didekatkan pada bahan aluminium, platina, mangan, tembaga, seng, emas, kayu, dan plastik seolah-olah tidak terjadi apa-apa. Akan tetapi, saat didekatkan pada bahan besi, nikel, dan baja, bahan-bahan yang tidak dapat ditarik dengan kuat oleh magnet tidak dapat dijadikan magnet. Namun, sebaliknya bahan-bahan yang dapat ditarik dengan kuat oleh magnet dapat dijadikan magnet.

Bahan-bahan yang dapat ditarik oleh magnet disebut *bahan magnetik* dan yang tidak dapat ditarik oleh magnet disebut *bahan nonmagnetik*. Lebih lanjut, bahan magnetik diklasifikasikan sebagai berikut.

- Bahan ferromagnetik, bahan yang ditarik dengan kuat oleh magnet. Contohnya, nikel, besi, baja, dan kobalt.
- Bahan diamagnetik, bahan yang ditarik lemah oleh magnet. Contohnya, aluminium dan platina.
- Bahan diamagnetik, bahan yang sedikit menolak magnet. Contohnya, seng, bismuth, dan natrium klorida.

Berdasarkan asalnya, magnet dibagi menjadi dua kelompok, yaitu magnet alam adalah magnet yang ditemukan di alam dan magnet buatan adalah magnet yang sengaja dibuat oleh manusia.

Berdasarkan sifat kemagnetannya, magnet buatan dikelompokkan menjadi magnet tetap (permanen) dan magnet sementara. Magnet tetap adalah magnet yang sifat kemagnetannya tetap (terjadi dalam waktu yang relatif lama). Sebaliknya, magnet sementara adalah magnet yang sifat kemagnetannya tidak tetap atau sementara.

Berdasarkan penggolongan magnet buatan serta kemampuan bahan menyimpan sifat magnetnya maka kita dapat menggolongkannya bahan-bahan magnetik ke dalam magnet keras dan magnet lunak. Contoh magnet keras adalah baja dan alcomax. Bahan ini sulit untuk dijadikan magnet maka bahan-bahan magnet keras ini sangat sulit untuk dijadikan magnet. Namun, setelah bahan ini menjadi magnet, sifat magnetiknya relatif sangat lama. Karena pertimbangan atau alasan itulah bahan-bahan magnet keras ini lebih banyak dipakai untuk membuat magnet tetap (permanen). Contoh pemakaiannya adalah pita kaset dan kompas.



Gambar 3.4

Contoh pemakaian magnet dalam kehidupan sehari-hari

Bahan-bahan magnet lunak, misalnya besi dan mu-metal, jauh lebih mudah untuk dijadikan magnet. Namun demikian, sifat kemagnetannya bersifat sementara atau mudah hilang. Itulah sebabnya, bahan-bahan magnet lunak ini banyak dipakai untuk membuat elektromagnetik (magnet listrik).

3. Kutub-kutub Magnet

Apakah kamu pernah memperhatikan di mana kutub-kutub magnet itu? Untuk mempermudah pemahamanmu tentang bagian magnet yang memiliki gaya tarik terbesar terhadap benda-benda di sekitarnya.

Bagian magnet yang memiliki gaya tarik terbesar disebut kutub-kutub magnet. Setiap magnet memiliki dua kutub dan bagian magnet di antara dua kutub itu disebut daerah netral.

4. Menentukan Kutub-kutub Magnet

Apabila semua magnet dapat bergerak bebas, magnet tersebut akan selalu berusaha untuk menempatkan diri sehingga salah satu kutubnya menghadap kutub utara geografis dan kutub selatan geografis.

Apabila kamu buat tanda pada kedua ujung magnet, kamu dapat menentukan arah masing-masing ujung magnet itu. Menurut kesepakatan para ahli, ujung-ujung magnet yang mengarah ke kutub utara geografis bumi disebut **kutub utara magnet** dan ujung yang mengarah ke arah utara kutub selatan geografis bumi disebut **kutub selatan magnet**.

Dengan demikian, magnet memiliki dua kutub, yaitu kutub utara dan kutub selatan. Berdasarkan penentuan kutub-kutub magnet dapat dimanfaatkan sebuah kompas, misalnya untuk menentukan haluan kapal atau pesawat terbang.

5. Membuat Magnet

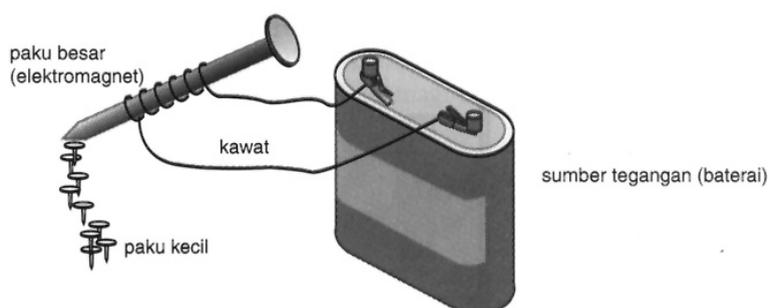
Ada tiga cara membuat magnet, yaitu menggunakan arus listrik, dengan cara menggosok, dan dengan cara induksi.

a. Menggunakan Magnet dengan Menggunakan Arus Listrik

Jika sebuah besi dililit kawat berarus listrik, besi akan menjadi magnet-magnet hanya selama arus listrik mengalir. Apabila arus listrik dihentikan, sifat magnetik bahan tadi menjadi hilang kembali. Umumnya, sifat magnetik elektromagnetik dapat diatur melalui sebuah sakelar yang berfungsi sebagai penyambung dan pemutus arus

b. Membuat Magnet dengan Cara Menggosok

Apabila kamu menggosok ujung magnet batang permanen ke sepanjang permukaan batang besi atau baja dengan satu arah saja, kutub magnet yang dihasilkan pada ujung terakhir penggosok selalu berlawanan dengan kutub ujung magnet penggosoknya.



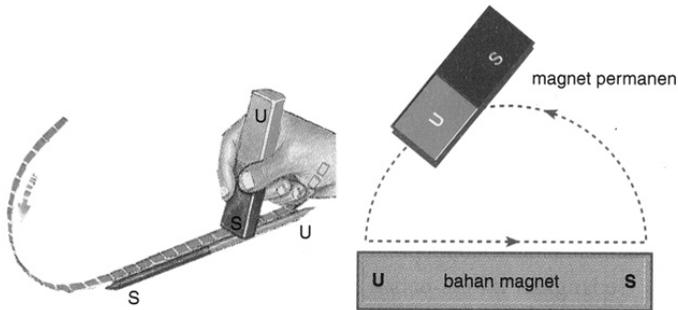
Gambar 3.5

Membuat magnet menggunakan arus listrik

Kamu perlu perhatikan bahwa pada ujung gosokan, magnet permanen diangkat tinggi-tinggi di atas bahan yang dibuat magnet agar kemagnetannya tidak menjadi lemah.

c. Membuat Magnet dengan Cara Induksi

Bagaimana membuat magnet dengan cara induksi? Coba kamu sediakan sebatang magnet permanen yang kuat digantung pada tiang seperti pada gambar berikut.



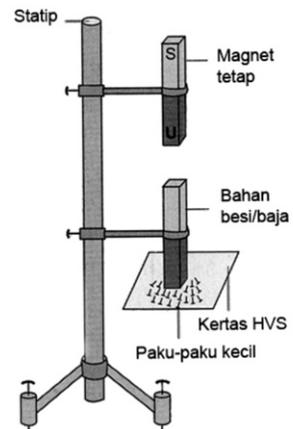
Gambar 3.6

Membuat magnet dengan cara digosok

Sepotong besi/baja didekatkan pada kutub utara magnet tersebut (tidak menyentuh). Apabila di bawah batang besi/baja itu diletakkan paku-paku kecil/serbuk besi, paku-paku/serbuk besi akan ditarik oleh kedua batang tersebut. Hal ini berarti bahan batang besi/baja tersebut menjadi magnet.

Peristiwa batang/besi menjadi magnet akibat didekatkan pada magnet permanen yang kuat disebut **induksi magnet**. Kutub magnet induksi selalu berlawanan dengan kutub magnet permanen.

Jika magnet tersebut kita jauhkan dari batang besi dan baja, sifat kemagnetan pada besi menjadi hilang, sedangkan sifat kemagnetan pada baja tetap. Hal ini disebabkan sifat kemagnetan yang dimiliki oleh bahan baja lebih kuat dibandingkan dengan sifat kemagnetan yang dimiliki oleh bahan besi.



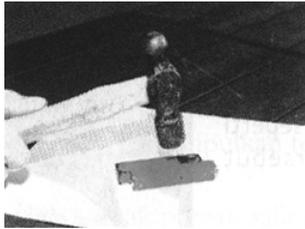
Gambar 3.7

Membuat magnet dengan cara induksi

6. Menghilangkan Sifat Kemagnetan

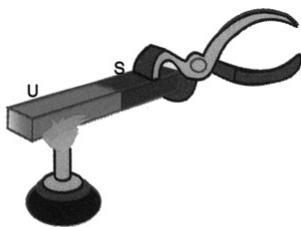
Sebelumnya kita telah mempelajari bagaimana membuat magnet dengan menggunakan beberapa cara. Sekarang, kita akan mempelajari bagaimana menghilangkan sifat kemagnetan sebuah benda.

Magnet dapat rusak atau hilang sifat kemagnetannya. Penyebab hilangnya sifat kemagnetan antara lain dengan cara dipukul-pukul dengan palu, dipanaskan atau dibakar, dan dialiri arus listrik bolak-balik (AC).



Gambar 3.8

Menghilangkan sifat magnet dengan cara dipukul



Gambar 3.9

Menghilangkan sifat magnet dengan cara dibakar

a. Dipukul dengan Palu

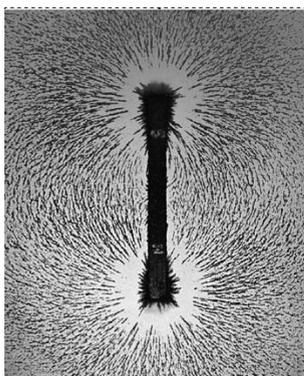
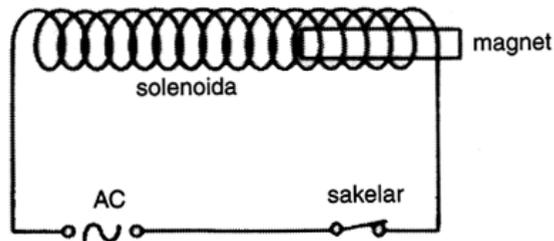
Magnet yang dipukul dengan palu akan mengakibatkan magnet tidak beraturan. Ini mengakibatkan magnet kehilangan sifat magnetnya.

b. Dipanaskan atau Dibakar

Apabila kita membakar magnet, magnet akan cepat kehilangan sifat magnetnya. Hal ini disebabkan magnet kecil bertambah getarannya yang mengakibatkan magnet kecil tidak beraturan letaknya.

c. Dialiri Arus Bolak-Balik (AC)

Cara yang terbaik untuk menghilangkan sifat magnet suatu bahan adalah dengan menggunakan arus bolak-balik (AC). Dengan menempatkan magnet ke dalam solenoida yang dihubungkan dengan arus bolak-balik (AC), magnet secara perlahan akan berpindah mengikuti aliran listrik bolak-balik dalam solenoida.



Gambar 3.10

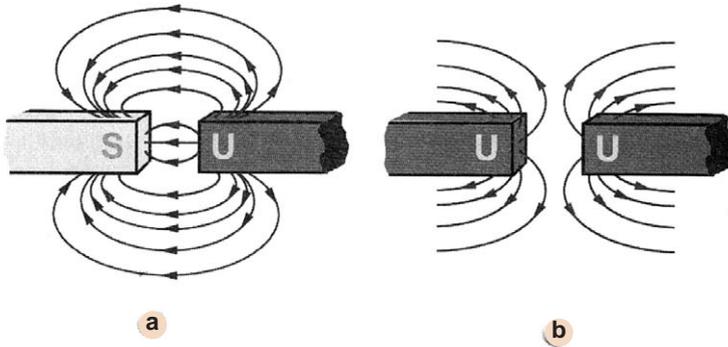
Garis gaya magnet dapat ditunjukkan jika serbuk kayu didekatkan dengan magnet

B. Medan Magnetik

Medan magnet adalah ruang di sekitar magnet tempat magnet lain atau benda lain yang dapat dipengaruhi magnet mengalami gaya magnet. Jika Anda meletakkan kertas putih di atas sebuah magnet dan menaburkan garis-garis gaya magnet dari magnet tersebut. Perhatikan gambar berikut.

Garis-garis gaya magnet selalu keluar dari kutub utara magnet dan masuk ke kutub selatan magnet. Sementara dalam magnet, garis-garis gaya magnet memiliki arah dari kutub selatan magnet ke kutub utara magnet. Garis-garis tersebut tidak pernah saling berpotongan. Kerapatan garis-garis gaya magnet menunjukkan kekuatan medan magnet.

Jika dua kutub yang tidak sejenis saling berhadapan akan diperoleh garis-garis gaya magnet yang saling berhubungan. Jika dua kutub yang sejenis dan saling berhadapan akan diperoleh garis-garis gaya magnet yang menekan dan saling menjauhi.



Gambar 3.11

- a) garis gaya yang sekutub
- b) aris-garis gaya magnet yang tidak searah

Kutub-kutub yang tidak sejenis (utara-selatan) apabila didekatkan akan saling tarik-menarik, sedangkan kutub-kutub yang sejenis (utara-utara atau selatan-selatan) apabila didekatkan akan saling tolak-menolak.

1. Medan Magnetik di Sekitar Kawat Lurus Berarus Listrik

Di sekitar kawat yang berarus listrik terdapat medan magnetik yang dapat mempengaruhi magnetik lain. Medan magnetik adalah ruang di mana magnet lain masih mengalami magnetil. Magnet jarum kompas dapat menyimpang dari posisi normalnya jika dipengaruhi oleh medan magnetik. Pada keadaan diam, kompas selalu menunjukkan arah utara-selatan.

Hans Christian Oersted adalah orang yang kali pertama melakukan penelitian untuk menentukan adanya medan magnetik di sekitar yang berarus listrik. Coba Anda perhatikan eksperimen Oersted berikut ini.



Gambar 3.12

Hans Christian Oersted

Eksperimen 3.1

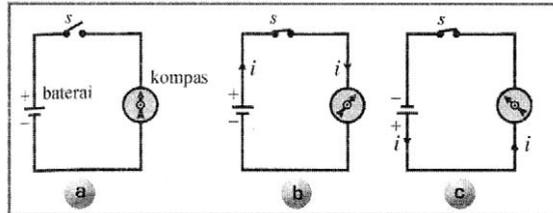
Mengamati Medan Magnet di Sekitar Kawat Berarus Listrik

Alat dan Bahan:

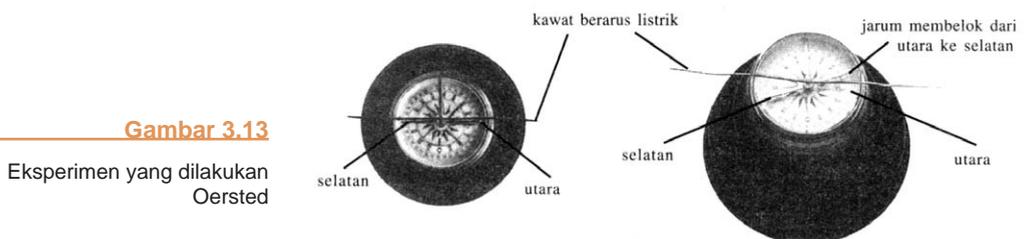
- Sebuah sakelar
- Sebuah kompas kecil
- Seutas kawat panjang ± 1 m

Langkah-Langkah Eksperimen:

1. Coba Anda susun rangkaian seperti gambar berikut.



2. Dalam keadaan sakelar (s) terbuka, letakkan kawat di atas kompas dengan arah memanjang dan kawat sejajar dengan arah jarum kompas.
3. Kemudian, tutuplah sakelar (s), seperti **Gambar (b)**. Apakah yang terjadi pada jarum kompas tersebut?
4. Balikkan polaritas baterai seperti **Gambar (c)**, lalu lakukan pengamatan yang sama seperti pada langkah (3).
5. Kemudian, tambahkan jumlah baterai. Ulangi pengamatan yang sama seperti pada langkah (1) sampai dengan langkah (4).
6. Geserkan kompas hingga menjauhi kawat, kemudian catat jaraknya. Ulangi pengamatan seperti pada langkah (1) sampai dengan langkah (4).
7. Apa yang dapat Anda simpulkan?

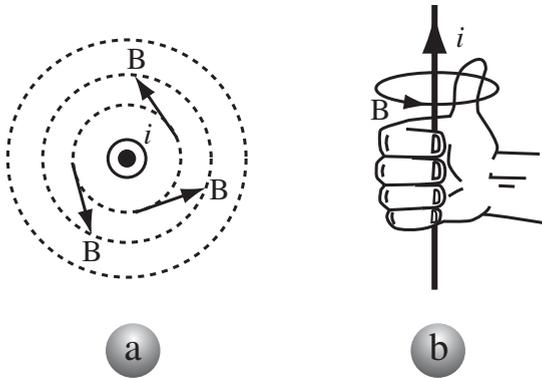


Gambar 3.13

Eksperimen yang dilakukan Oersted

Dari eksperimennya, Oersted mengambil suatu kesimpulan bahwa di sekitar arus listrik ada medan magnetik sehingga dapat mempengaruhi kedudukan magnet jarum. Arah garis-garis medan magnetik yang terdapat di sekitar

kawat berarus sesuai dengan kaidah tangan kanan atau aturan sekrup putar kanan, seperti yang terlihat pada gambar berikut.



Gambar 3.14

- a. Jika arus tegak lurus bidang ke atas menuju Anda. Arah medan magnet berputar berlawanan arah jarum jam. Namun, jika arah arus tegak lurus bidang ke bawah menuju Anda arah kedua magnet berputar searah jarum jam
- b. Kaidah Tangan Kanan

Kaidah Tangan Kanan

“Arah ibu jari menunjukkan arah arus listrik dan arah lipatan jari-jari yang lainnya menunjukkan arah putaran garis-garis medan magnetik.”

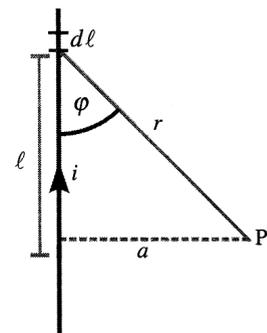
2. Hukum Biot-Savart

Secara teoritis, Lorentz telah menyatakan besar kuat medan magnetik atau induksi magnetik di sekitar arus listrik.

Menurut teori Lorentz, besarnya induksi magnetik yang disebabkan oleh elemen arus adalah berbanding lurus dengan kuat arus listrik, berbanding lurus dengan panjang kawat, berbanding terbalik dengan kuadrat jarak titik yang diamati ke kawat dan arah induksi magnetiknya tegak lurus terhadap bidang yang melalui elemen arus dan titik yang diamati.

Pada 1820, setahun setelah Oersted mencetuskan teorinya, dua orang ilmuwan Prancis bernama **Jean Baptiste Biot (1774-1862)** dan **Felix Savart (1791-1841)**, mengemukakan perhitungan lebih lanjut tentang induksi magnetik oleh elemen arus.

Coba Anda perhatikan gambar di atas, sepotong elemen kawat $d\ell$ dilalui arus listrik (i). Arus listrik menimbulkan induksi magnetik di P sebesar dB . Jarak titik P ke kawat $d\ell$ adalah r , dengan arah arus i dan jarak membentuk sudut



Gambar 3.15

....

φ . Besarnya induksi magnetic di titik P karena pengaruh elemen kawat yang berarus listrik menurut Biot-Savart adalah

$$dB = k \frac{(i)(dl) \sin \varphi}{r^2}$$

Dengan menggantikan nilai k menjadi:

$$k = \frac{\mu_o}{4\pi} = 10^{-7} \text{ weber/Am}$$

Maka, akan diperoleh:

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{(i)(dl) \sin \varphi}{r^2}$$

Untuk nilai l yang sangat panjang sehingga nilai batasnya ditentukan:

- Batas-batas menjadi dan
- Batas-batas menjadi 0 dan

Dengan mempergunakan gambar di atas akan diperoleh:

$$\frac{a}{r} = \sin \varphi \Rightarrow r = \frac{a}{\sin \varphi} = a \operatorname{cosec} \varphi$$

$$\frac{l}{a} = \cot \varphi \Rightarrow l = a \cot \varphi \Rightarrow dl = -a \operatorname{cosec}^2 \varphi$$

Sehingga persamaan di atas dapat ditulis menjadi:

$$dB = \frac{\mu_o i}{4\pi} \frac{(-a \cos^2 \varphi) d\varphi \sin \varphi}{(-a \operatorname{cosec} \varphi)^2}$$

$$dB = - \frac{\mu_o i}{4\pi} \frac{\sin \varphi d\varphi}{a}$$

Untuk menentukan nilai induksi magnet (B) pada persamaan di atas maka persamaan itu perlu diintegrasikan sehingga akan diperoleh:

$$B = \int dB = \int_0^\pi - \frac{\mu_o i}{4\pi} \frac{\sin \varphi d\varphi}{a} = - \frac{\mu_o i}{4\pi a} \int_0^\pi \sin \varphi d\varphi$$

$$B = \frac{\mu_o i}{4\pi a} \cos \varphi \Big|_0^\pi = \frac{\mu_o i}{4\pi a} (\cos 0 - \cos \pi)$$

$$B = \frac{\mu_0 2i}{4\pi a}$$

Karena $(\cos 0 - \cos \pi) = (1) - (-1) = 2$

Dengan demikian, persamaanya menjadi

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

Keterangan:

B = induksi magnetik di titik yang diamati (Wb m^{-2})

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb A}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

i = kuat arus listrik (A)

a = jarak titik dari kawat (m)

Contoh Soal 3.1

Sebuah kawat lurus panjang dialiri arus sebesar 4 A. Tentukanlah besarnya induksi magnetik pada sebuah titik yang berada sejauh 20 cm disebelah kanan kawat. Jika arah arus pada kawat ke atas, ke manakah arah induksi magnetiknya?

Jawaban :

Diketahui:

$$i = 4 \text{ A}; a = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb A}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi a} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb A}^{-1} \text{ m}^{-1})(4 \text{ A})}{2\pi (0,2 \text{ m})} = 4 \times 10^{-5} \text{ Wb m}^{-2}$$

Maka,

Jadi, besarnya induksi magnetik di titik P adalah $4 \times 10^{-5} \text{ Wb m}^{-2}$. Dengan menggunakan kaidah tangan kanan, arah induksi magnetik di sekitar kawat di sebelah

- Kanan kawat masuk bidang kertas
- Kiri kawat keluar bidang kertas

Tahukah Anda?



Kareta Api Maglev

Selama tahun 1950-an, seorang insinyur dari Inggris, **Eric Lathwaite**, mengembangkan sebuah motor yang dapat mengangkat kereta api di atas rel oleh tarikan magnetik. Walaupun sekarang digunakan dalam skala kecil, kereta api Maglev ini akan menjadi kereta api masa depan.

Sumber: *Buku Saku Penemuan*, 1997

Setelah penemuan Oersted ini, lalu Biot-Savart menjelaskan tentang induksi magnetik di sekitar kawat berarus listrik, serta Ampere menemukan hubungan antara kuat arus listrik dan induksi magnetik di sekitar kawat berarus listrik. Hasil perhitungan yang ditunjukkan Ampere jauh

lebih sederhana dibandingkan dengan perhitungan yang telah diberikan Oersted serta Biot-Savart. Ampere mendatakannya dengan menggunakan Hukum Gauss, berbeda dengan Oersted dan Biot-Savart yang menggunakan pendelatan Hukum Coulomb.

Menurut Ampere,

$$\sum (B \Delta l) = \mu_0 i \Rightarrow B \sum \Delta l = \mu_0 i$$

Dengan $\sum \Delta l$ adalah keliling lingkaran di sekitar kawat berarus listrik. Jika jari-jari keliling lingkaran a , $\sum \Delta l = 2\pi a$ sehingga akan diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$B(2\pi a) = \mu_0 i \Rightarrow B = \frac{\mu_0 i}{2\pi a}$$

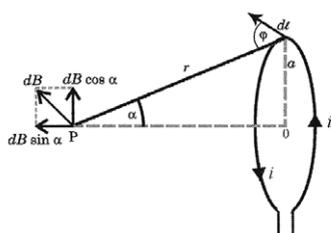
Jadi, persamaan yang diperoleh Ampere sama dengan hasil penemuan Biot-Savart, tetapi untuk mendapatkan persamaan tersebut jauh lebih sederhana.

3. Medan Magnetik di Sekitar Kawat Melingkar Berarus Listrik

Jika pada kawat lurus panjang kita dapat menentukan induksi magnetik pada sembarang titik di sekitar kawat tersebut. Maka, pada kawat yang bentuknya melingkar, medan magnetic yang akan ditentukan dibatasi pada sumbu kawat saja, termasuk pada pusat lingkaran kawat. Karena induksi magnetik pada sembarang titik di sekitar arus melingkar sangat kompleks.

Coba Anda perhatikan gambar berikut, sebuah kawat membentuk lingkaran dengan jari-jari a dialiri arus listrik i . Jarak titik P ke keliling lingkaran adalah r dan sudut yang dibentuk oleh r dan sumbu pusat lingkaran adalah α .

Untuk menentukan arah medan magnet pada sumbu lingkaran, coba Anda gunakan aturan tangan kanan berikut ini.



Gambar 3.16

Sebuah kawat membentuk lingkaran dengan jari-jari a

Induksi magnetik di P oleh elemen kawat dl yang dilalui arus i adalah sebagai berikut.

$$dB = \frac{\mu_0 (i)(dl) \sin \phi}{4\pi r^2}$$

Oleh karena r tegak lurus, berarti $\phi = 90^\circ$ sehingga persamaan di atas dapat dituliskan sebagai berikut menjadi

$$dB = \frac{\mu_0 (i)(dl) \sin 90^\circ}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 i dl}{4\pi r^2}$$

Coba Anda perhatikan, vektor dapat diuraikan menjadi dua komponen, yaitu yang sejajar dengan sumbu lingkaran adalah dB_{\parallel} dan yang tegak lurus sumbu lingkaran adalah dB_{\perp} . Komponen dB_{\perp} akan saling menghilangkan dengan komponen yang berasal dari elemen lain yang berseberangan sehingga hanya komponen dB_{\parallel} saja yang masih tersisa.

$$dB = \frac{\mu_0 i dl \sin \alpha}{4\pi r^2}$$

Induksi magnetik di titik P dari seluruh bagian lingkaran yang kelilingnya sama dengan panjang seluruh kawat adalah

$$B = \int_0^l dB = \frac{\mu_0 i \sin \alpha}{4\pi r^2} \int_0^{2\pi a} dl = \frac{\mu_0 i \sin \alpha}{4\pi r^2} (2\pi a)$$

Jika P digeser sehingga menjadi titik pusat lingkaran, $r = a$ dan $\alpha = 90^\circ$. Induksi magnetik di titik pusat lingkaran menjadi

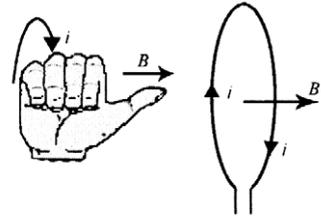
$$B = \frac{\mu_0 i a \sin \alpha}{2r^2} = \frac{\mu_0 i a \sin 90^\circ}{2a^2}$$

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

Jadi, persamaan di atas digunakan untuk menentukan induksi magnetik di titik pusat lingkaran kawat dengan jari-jari a dan arus listrik i .

Untuk suatu kumparan tipis dengan N buah lilitan, induksi magnetic di titik pusat lingkaran menjadi

$$B = \frac{\mu_0 i N}{2a}$$



Gambar 3.17

Jari-jari yang dilipat sebahai arus dan ibu jari arah medan magnet

Untuk menentukan induksi magnetik di titik P yang terletak pada sumbu lingkaran akan diperoleh

$$B_p = \frac{\mu_0 i \sin \alpha}{4\pi r^2} (2\pi a) = \frac{\mu_0 i a}{2r^2} \sin \alpha$$

$$\sin \alpha = \frac{a}{r}$$

Karena sehingga persamaan tersebut dapat diubah menjadi

$$B_p = \frac{\mu_0 i a^2}{2a r^2} \sin^3 \alpha$$

$$B_p = \frac{\mu_0 i}{2a} \sin^3 \alpha$$

Persamaan di atas digunakan untuk menentukan induksi magnetik pada sebuah titik sumbu lingkaran yang memiliki jari-jari a .

Contoh Soal 3.2

Sebuah kawat yang dibentuk menjadi sebuah lingkaran dengan jari-jari 20 cm dialiri arus listrik sebesar 6 A. Tentukanlah besarnya induksi magnetik di titik pusat lingkaran.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$a = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}; i = 6 \text{ A}$$

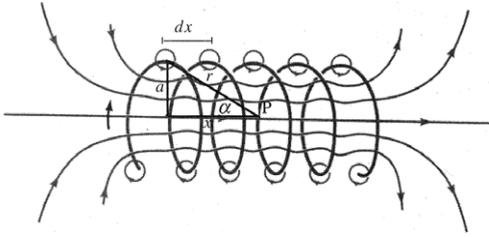
Dengan menggunakan persamaan $B = \frac{\mu_0 i}{2a}$ akan diperoleh

$$B = \frac{\mu_0 i}{2a} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wbm}^{-2})(6 \text{ A})}{2(0,2)} = 6\pi \times 10^{-6} \text{ Wbm}^{-2}$$

Jadi, induksi magnetik di titik pusat lingkaran adalah $6\pi \times 10^{-6} \text{ Wbm}^{-2}$.

4. Medan Magnetik Solenoida

Kumparan panjang yang terdiri dari banyak lilitan kawat penghantar, yang menyerupai sebuah lilitan pegas disebut dengan solenoida. Gambar berikut ini ditunjukkan sebuah solenoida.



Gambar 3.18

Solenoida dengan panjang ℓ dan terdiri atas M buah lilitan

Misalnya, panjang solenoida ℓ terdiri atas N buah lilitan.

Jumlah lilitan setiap satuan panjang menjadi $n = \frac{N}{\ell}$ dan jari-jari kumparan a . Menurut Biot dan Savart, induksi magnetic di titik P yang terletak pada sumbu solenoida dan disebabkan oleh elemen solenoida sepanjang dx adalah sebagai berikut.

$$dB = \frac{\mu_0 a i n}{2r^2} \sin \alpha dx$$

Dengan α adalah sudut antara r dan x .

$$\frac{a}{r} = \cotg \alpha \Rightarrow x = a \cotg \alpha \Rightarrow dx = -a \operatorname{cosec}^2 \alpha d\alpha$$

Dengan cara mensubstitusikan harga r dan dx ke dalam

persamaan $dB = \frac{\mu_0 a i n}{2r^2} \sin \alpha dx$ akan diperoleh

$$\begin{aligned} dB &= \frac{\mu_0 a i n}{2(a \operatorname{cosec} \alpha)^2} \sin \alpha (-a \operatorname{cosec}^2 \alpha d\alpha) \\ &= -\frac{\mu_0 i n}{2} (-\cos \alpha) \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2} \end{aligned}$$

$$B = \frac{\mu_0 n i}{2} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)$$

Jika solenoida sangat panjang sehingga batas-batas sudutnya menjadi $\alpha_2 = 0^\circ$ dan $\alpha_1 = 180^\circ$. Untuk titik P yang terletak di tengah solenoida, induksi magnetic di titik P akan menjadi

$$B = \frac{\mu_0 i n}{2} (\cos 0^\circ - \cos 180^\circ) = \frac{\mu_0 i n}{2} (1 + 1)$$

$$B = \mu_0 i n \quad \text{atau} \quad B = \frac{\mu_0 N i}{l}$$

dengan n adalah banyaknya lilitan per panjang kawat ($\frac{N}{l}$). Coba bandingkan dengan penemuan Ampere.

$$\sum (B \Delta l) = \mu_0 i N \Rightarrow B \sum \Delta l = \mu_0 i N$$

dengan Δl adalah panjang solenoida sehingga

$$B l = \mu_0 i N \Rightarrow B = \frac{\mu_0 i N}{l}$$

Hasilnya sama, tetapi cara untuk memperoleh persamaan tersebut lebih sederhana.

Untuk titik P yang berada di ujung kiri dan kanan solenoida, persamaannya akan menjadi $\alpha_2 = 0^\circ$ dan $\alpha_1 = 90^\circ$.

$$B = \frac{\mu_0 i n}{2} (\cos 0^\circ - \cos 90^\circ) = \frac{\mu_0 i n}{2}$$

$$B = \frac{\mu_0 i n}{2} \quad \text{atau} \quad B = \frac{\mu_0 i N}{2l}$$

Jadi, induksi magnetik pada sumbu solenoida dapat

dihitung dengan menggunakan persamaan $B = \frac{\mu_0 i n}{2}$ dan $B = \frac{\mu_0 i N}{2l}$

Contoh Soal 3.3

Suatu solenoida panjangnya 8 m dengan jumlah lilitan 1600 lilitan. Jika pada solenoida mengalir arus sebesar 4 A, tentukanlah induksi magnetik pada sebuah titik di tengah solenoida yang terletak pada sumbunya.

Penyelesaian:

Diketahui:

$N = 1600$ lilitan

$$l = 8 \text{ m} \Rightarrow n = \frac{N}{l} = \frac{1600 \text{ lilitan}}{8 \text{ m}} = 200 \text{ lilitan}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ WbA}^{-1}\text{m}^{-1}$$

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

Maka,

$$B = \mu_0 i n$$

$$B = (4\pi \times 10^{-7} \text{ WbA}^{-1}\text{m}^{-1})(4 \text{ A})(200 \text{ lilitan per meter})$$
$$= 1,6\pi \times 10^{-4} \text{ Wbm}^{-2}$$

Jadi, induksi magnetiknya adalah $1,6\pi \times 10^{-4} \text{ Wbm}^{-2}$.

2. Medan Magnet Toroida

Apabila sebuah solenoida dilengkungkan sehingga sumbunya membentuk sebuah lingkaran, solenoida tersebut disebut *toroida*. Coba Anda perhatikan gambar sebuah toroida berikut ini.

Sesuai dengan persamaan induksi magnetik di tengah solenoida maka besarnya magnetic pada sumbu toroida akan menjadi persamaan berikut.

$$B = \mu_0 n i$$

Dengan n adalah jumlah lilitan kawat (N) per satuan panjang kawat. Dalam hal ini panjang kawat adalah sama dengan keliling lingkaran ($2\pi r$) sehingga persamaannya menjadi sebagai berikut.

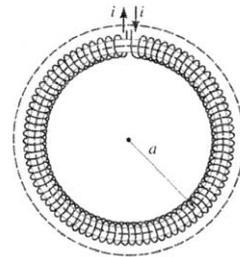
$$B = \frac{\mu_0 N i}{2\pi a}$$

dengan a adalah jari-jari toroida.

Akan tetapi, menurut Ampere persamaannya akan menjadi sebagai berikut.

$$(B \Delta l) = \mu_0 N i$$

dengan Δl adalah $2\pi r$ sehingga $B = \frac{\mu_0 N i}{2\pi a}$



Gambar 3.19

Sebuah magnet dengan jari-jari a

C. Gaya Magnet

Jika sebuah penghantar yang ditempatkan pada medan magnet atau induksi magnetic maka akan mengalami gaya. Gaya yang dialami oleh penghantar yang berarus listrik disebut *gaya Lorentz*.

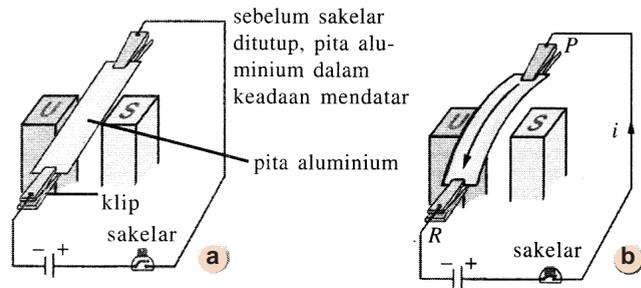
Eksperimen 3.2

Mengamati Medan Magntik di Sekitar Kawat Berarus Listrik

- Alat dan Bahan:
- Selembaar pita aluminium (aluminium foil)
- Sebuah magnet U yang kuat
- Sebuah baterai
- Sebuah sakelar
- Dua buah penjepit (klip)

1. Gaya Magnetik pada Sebuah Kawat Berarus Listrik

Gaya magnet dapat dialami oleh sebuah kawat berarus listrik dalam medan magnet. Untuk memahami gaya magnet tersebut, coba Anda lakukan eksperimen berikut ini.



Gambar 3.20

Langkah-Langkah Kegiatan:

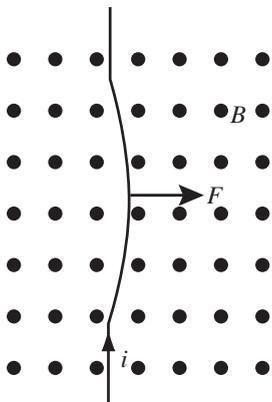
1. Coba Anda rentangkan pita aluminium di antara kutub utara-selatan magnet.
2. Hubungkan ujung-ujung pita ke baterai melalui sakelar.
3. Tutuplah sakelar agar arus listrik mengalir melalui pita.
4. Apa yang terjadi dengan pita aluminium?
5. Balikkan polaritas baterai, kemudian ulangi langkah nomor 1 sampai dengan nomor 4.
6. Berikan kesimpulan dari eksperimen yang Anda lakukan.

Besaran-besaran yang mempengaruhi gaya magnet F pada sebuah kawat berarus listrik i dalam medan magnet B dengan cara mengamati besarnya penyimpangan pita aluminium. Semakin besar gaya magnet maka akan semakin besar pula penyimpangan pita aluminium.

Apabila Anda memperbesar kuat arus listrik i dengan cara menambah jumlah baterai, tanpa mengganti magnet U , ternyata penyimpangan pita menjadi semakin besar. Kita dapat simpulkan bahwa besarnya gaya magnet F bergantung pada magnet U yang semula dengan magnet U yang lebih kuat, tanpa menambah jumlah baterai, ternyata penyimpangan pita menjadi semakin besar. Kita dapat simpulkan pula bahwa besarnya gaya magnet F bergantung pada induksi magnet B . Jika Anda mengganti pita aluminium yang semula dengan pita aluminium yang sedikit lebih panjang, tanpa menambah jumlah baterai ataupun mengganti magnet U , ternyata penyimpangan pita menjadi semakin besar. Dapat disimpulkan bahwa besarnya gaya magnet F bergantung pada panjang kawat l .

Kawat penghantar berarus listrik yang ditempatkan dalam induksi magnetic akan melengkung karena pengaruh gaya Lorentz.

Coba Anda perhatikan gambar berikut, tampak kawat melengkung ke kanan sebab induksi magnetik yang arahnya keluar tegak lurus bidang gambar.



Gambar 3.21

Sebuah kawat penghantar berarus listrik melengkung ke bawah kaena pengaruh gaya Lorentz

Besarnya gaya Lorentz yang dialami oleh penghantar dengan panjang l yang dialiri arus listrik I dalam medan magnet homogen B , memenuhi persamaan

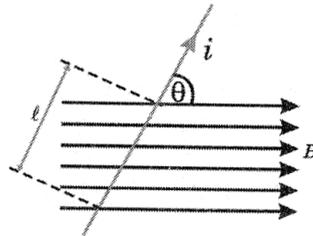
$$F = Bil \sin \theta$$

dengan θ adalah sudut yang dibentuk oleh arus I dan arah medan magnet B . Jika $\theta = 90^\circ$ atau i dan B saling tegak lurus, persamaannya menjadi

$$F = Bil$$

karena $\sin 90^\circ = 1$

Jadi, besarnya gaya Lorentz yang dialami oleh kawat penghantar sebanding dengan induksi magnetik (B), arus listrik (i), panjang kawat (l), serta bergantung pada sudut yang dibentuk oleh B dan i .

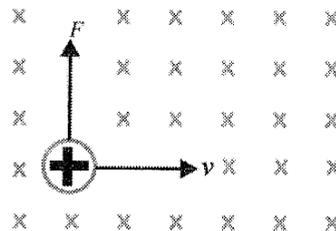


Gambar 3.22

Penghantar dengan panjang l berarus listrik i dengan medan magnet homogen

2. Gaya Magnetik pada Muatan Bergerak

Coba Anda perhatikan gambar di bawah ini, untuk muatan listrik yang bergerak dengan kecepatan v dalam medan magnet homogen B , penjelasannya adalah sebagai berikut



Gambar 3.23

Muatan listrik q bergerak dengan kecepatan v dalam medan magnet homogen B (sarah medan magnet masuk bidang kertas)

Hubungan antara muatan (q) dan kuat arus (i) adalah $i = \frac{dq}{dt}$. Lalu, ruas kiri dan ruas kanan dikalikan dengan dl sehingga

$$idl = dq \frac{dl}{dt} = dqv$$

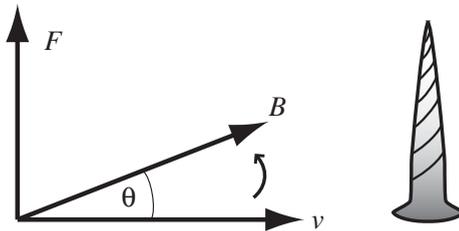
Coba Anda substitusikan nilai idl ke dalam persamaan $F = idl \sin\theta$ sehingga diperoleh persamaan

$$dF = dqvB \sin\theta$$

$$F = qvB \sin\theta$$

Persamaan di atas serupa dengan persamaan $F = Bil \sin\theta$ jika $\theta = 90^\circ$ atau $\sin 90^\circ = 1$ besarnya gaya Lorentz pada sebuah partikel bermuatan listrik yang bergerak dalam medan magnet B menjadi $F = qvB$.

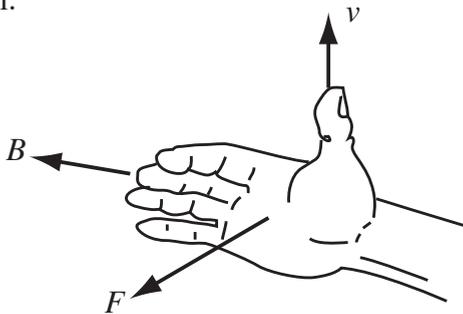
Untuk menentukan arah gaya Lorentz yang dialami oleh penghantar berarus listrik maupun muatan listrik yang bergerak dalam medan magnet yang homogen, digunakan aturan sekrup. Jika arus listrik i diputar ke arah medan magnet B , F adalah arah sekrup. Coba Anda perhatikan gambar berikut.



Gambar 3.24

Aturan sekrup untuk muatan positif

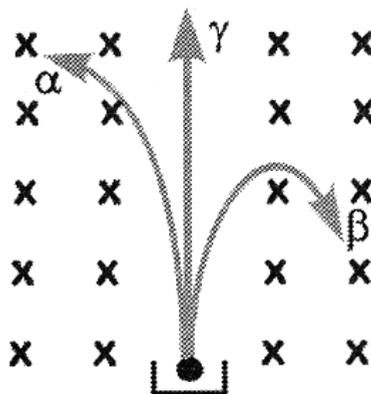
Arah gaya Lorentz juga dapat ditentukan dengan menggunakan aturan tangan kanan. Untuk menentukan arah gaya Lorentz pada muatan positif dengan menggunakan aturan tangan kanan, coba Anda amati gambar berikut ini.



Gambar 3.25

Aturan tangan kanan untuk muatan positif

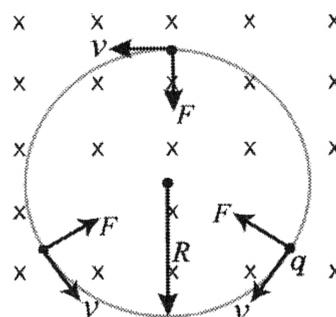
Coba Anda perhatikan gambar berikut ini, tiga partikel, yaitu α , β , dan γ bergerak dalam medan magnet homogen yang arahnya tegak lurus bidang kertas \otimes . Jika diketahui bahwa partikel bermuatan positif, partikel bermuatan negatif, dan partikel tidak bermuatan. Coba Anda tentukan arah pembelokan arah ketiga partikel tersebut dengan menggunakan aturan tangan kanan.



Gambar 3.26

Arah pembelokan dari partikel α , β dan γ dalam medan magnet.

Jika sebuah partikel bermuatan listrik bergerak dengan kecepatan v , tegak lurus dengan medan magnet homogen yang mempengaruhinya. Lintasan partikel tersebut berupa lingkaran. Gaya Lorentz berfungsi sebagai gaya sentripetal untuk bergerak melingkar ini. Selanjutnya, coba Anda perhatikan gambar berikut ini.



Gambar 3.27

Gaya yang dialami muatan bergerak dalam medan magnet

Dari persamaan $F = qvB \sin\theta$ jika untuk $\theta = 90^\circ$, persamaannya menjadi

$$F = qvB$$

Partikel tersebut bergerak melingkar karena mendapatkan gaya sentripetal yaitu nilainya sama dengan gaya Lorentz. Menurut Hukum II Newton, pada gerak melingkar beraturan berlaku persamaan:

$$F - ma = m \frac{v^2}{R}, \text{ dengan } F = qvB$$

Maka,
$$\frac{mv^2}{R} = qvB$$

$$R = \frac{mv}{qB}$$

dengan:

B = induksi magnetik homogen yang arahnya masuk bidang kertas (Wbm^{-2})

v = kecepatan partikel (m/s)

q = muatan partikel (C)

m = massa partikel (kg)

R = jari-jari lintasannya (m)

Jadi, jari-jari sebuah lintasan partikel yang bergerak dalam medan magnet homogen sebanding dengan momentum partikel (mv) serta berbanding terbalik dengan besarnya muatan partikel (q) dan induksi magnetik (B) yang mempengaruhinya.

Contoh Soal 3.4

Sebuah partikel bermuatan $0,6 \mu\text{C}$ berada dalam medan magnet homogen $B = 10^{-2} \text{Wbm}^{-2}$. Jika kecepatan partikel tegak lurus medan magnetnya dan lintasan partikel berupa lingkaran dengan jari-jari 80cm , tentukanlah besarnya momentum partikel.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$q = 0,6 \text{ C} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ C}; B = 10^{-2} \text{ Wbm}^{-2}; R = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$$

Dengan menggunakan persamaan

$$R = \frac{mv}{qB} \Rightarrow mv = qBR$$

sehingga momentum partikelnya adalah

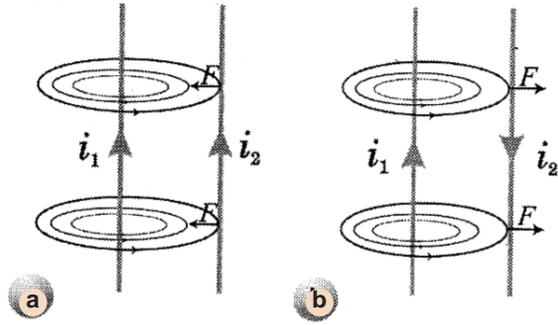
$$p = mv = qBR = (6 \times 10^{-7} \text{ C})(10^{-2} \text{ Wbm}^{-2})(0,8 \text{ m}) \\ = 4,8 \times 10^{-9} \text{ Ns}$$

3. Gaya Magnetik di Antara Dua Kawat Sejajar

Coba Anda perhatikan gambar berikut ini, dua kawat penghantar dipasang dan dialiri arus listrik.

Gambar 3.28

Dua proses penghantar yang dipasang sejajar dialiri arus listrik dengan arah
 a. searah;
 b. berlawanan

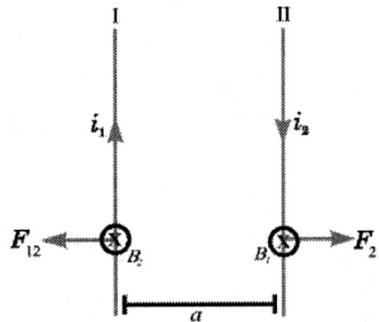


Ternyata pada **gambar (a)** kedua kawat saling mendekati atau tarik-menarik, sedangkan pada **gambar (b)** kedua kawat saling menjauhi atau tolak-menolak. Ini menunjukkan bahwa antara kedua kawat timbul gaya Lorentz.

Coba Anda perhatikan gambar berikut, besarnya gaya timbal balik antara satu kawat dan kawat yang lain dapat diturunkan sebagai berikut.

Gambar 3.29

Gaya timbal balik antara kawat (I) dan kawat (II)



Kawat pertama (I) akan dipengaruhi oleh induksi magnetik yang ditimbulkan oleh i_2 sebesar B dengan arah masuk bidang kertas sehingga arah gaya F_{12} ke kiri.

$$F_{12} = B_2 i_1 l_1, \text{ dengan } B_2 = \frac{\mu_0 i_2}{2\pi a} \text{ sehingga } F_{12} = \frac{\mu_0 i_2 i_1 l_1}{2\pi a}$$

Besarnya gaya per satuan panjang kawat

$$\left(\frac{F_{12}}{l_1} \right) \text{ adalah } \frac{F_{12}}{l_1} = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi a}$$

Kawat kedua (II) akan dipengaruhi oleh induksi magnetik yang ditimbulkan oleh i_1 sebesar B_1 , dengan arah masuk bidang kertas sehingga arah gaya F_{21} ke kanan. Dalam contoh ini, i_1 dan i_2 berlawanan arah sehingga kawat

(I) dan kawat (II) mengalami gaya tolak-menolak, yaitu F_{12} pada kawat (I) ke kiri, sedangkan pada kawat (II) mendapat gaya F_{21} ke kanan menjauhi kawat (II).

$$F_{21} = B_1 i_2 l_2, \text{ dengan } B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi a} \text{ sehingga } F_{21} = \frac{\mu_0 i_1 i_2 l_2}{2\pi a}$$

Besarnya gaya per satuan panjang kawat

$$\left(\frac{F_{21}}{l_2} \right) \text{ adalah } \frac{F_{21}}{l_2} = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi a}$$

$$\frac{F_{12}}{l_1} = \frac{F_{21}}{l_2} = \frac{F}{l}$$

Jadi, $\frac{F_{12}}{l_1} = \frac{F_{21}}{l_2} = \frac{F}{l}$, dan besarnya gaya per satuan panjang kawat pada masing-masing kawat adalah

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi a}$$

Jika kuat arus pada masing-masing kawat sama ($i_1 = i_2$) maka persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi a}$$

Satuan dari $\frac{F}{l}$ adalah N/m.

Contoh Soal 3.5

Dua kawat sejajar satu sama lain berjarak 20 cm, dialiri arus listrik sama besar. Jika antara kedua kawat timbul gaya tarik-menarik per satuan panjang kawat sebesar 2×10^{-4} N/m, hitunglah besarnya kuat arus pada masing-masing kawat.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$a = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}; F = 2 \times 10^{-4} \text{ N/m}$$

Gaya per satuan panjang dialami kedua kawat memenuhi persamaan:

$$F = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi a} \Rightarrow 2 \times 10^{-4} \text{ N/m} = \frac{(i^2)(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/m}^2)}{(2\pi)(0,2 \text{ m})}$$

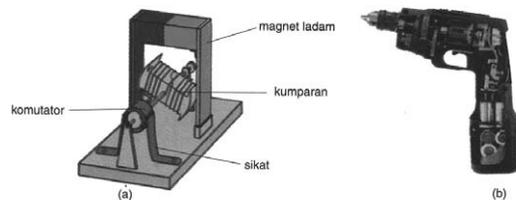
$$i^2 = (20 \text{ A})^2 \Rightarrow i = 20 \text{ A}$$

4. Penerapan Gaya Magnet

Gaya magnet dapat dimanfaatkan pada alat-alat yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi gerak, misalnya motor listrik dan alat ukur listrik.

1. Motor Listrik

Motor listrik sederhana arus searah terdiri dari kumparan yang ditempelkan pada as roda sehingga dapat berputar di antara kutub-kutub magnet berbentuk ladam. Ujung-ujung kumparan (koil) dihubungkan dengan cincin belah yang disebut komutator. Dua blok karbon yang disebut sikat menekan komutator.



Gambar 3.30

Motor listrik

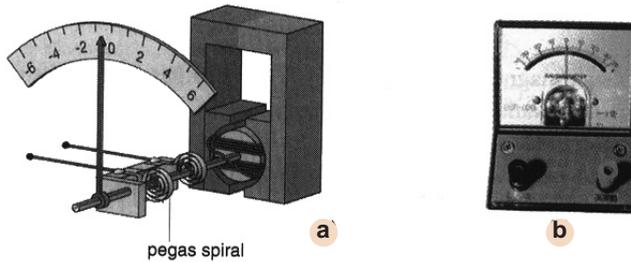
Arus listrik dialirkan masuk dan keluar dari kumparan/koil melalui sikat-sikat karbon. Komutator akan berputar bersamaan dengan kumparan, tetapi sikat-sikat karbon tidak ikut berputar sehingga kawat-kawat penghubung baterai tidak melintir (berpilin).

Dua sikat pada komutator mengubah arah arus sehingga mengubah-ubah gaya Lorentz pada keempat sisi kumparan. Akibatnya, kumparan berputar di antara dua kutub magnet. Motor listrik mengubah energi listrik menjadi energi gerak.

2. Alat Ukur Listrik

Salah satu jenis alat ukur listrik yang banyak digunakan adalah alat ukur jenis kumparan berputar. Bagian utama dari alat ukur jenis kumparan berputar adalah inti besi lunak berbentuk silinder yang dililiti kawat membentuk kumparan. Kumparan dengan inti besi lunak ini diletakkan di antara kutub-kutub sebuah magnet permanen.

Ketika arus listrik mengalir dalam kumparan maka di sisi kumparan yang dekat dengan kutub-kutub magnet mengalami gaya magnet yang berlawanan arah sehingga



Gambar 3.31

Alat ukur listrik

menyebabkan kumparan berputar. Karena putaran kumparan tersebut ditahan oleh kedua pegas spiral maka kumparan mengambil kedudukan pada suatu sudut putaran tertentu. Makin besar arus listrik yang mengalir ke dalam kumparan, makin besar pula sudut putarannya. Putaran dari kumparan diteruskan pegas ke jarum untuk menunjukkan angka dengan skala tertentu. Angka tersebut menyatakan besar kuat arus listrik atau besar tegangan listrik yang diukur. Alat ukur listrik dengan kumparan berputar banyak digunakan pada galvanometer, amperemeter, dan voltmeter.

D. Gaya Gerak Listrik (GGL) Induksi

Eksperimen Oersted menunjukkan bahwa arus listrik dapat menimbulkan medan magnet. Sepuluh tahun kemudian, **Michael Faraday (1771-1867)**, seorang ahli Fisika berkebangsaan Inggris dan **Yoseph Henry (1797-1878)**, seorang ahli Fisika berkebangsaan Amerika Serikat, menemukan kebalikan dari proses tersebut, yaitu medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Akan tetapi, arus listrik dalam kumparan hanya timbul apabila medan magnetnya selalu berubah terhadap waktu. Jadi, menurut Faraday perubahan medan magnet dapat menimbulkan arus listrik.

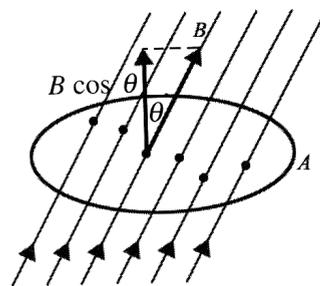
1. Fluks Magnetik

Konsep fluks magnetic untuk kali pertama dikemukakan oleh Ilmuwan Inggris yang bernama Michael Faraday untuk menggambarkan medan magnetic. Faraday menggambarkan medan magnet sebagai garis-garis gaya medan. Seberkas garis gaya yang dilingkupi oleh luas daerah tertentu disebut *fluks garis medan*. Oleh karena satu berkas dapat diambil

untuk sembarang luas tertentu, besarnya suatu fluks bergantung pada luas berkas yang diambil.

Faraday menggambarkan medan magnet dengan bantuan garis-garis meda. Lalu, garis-garis medan itu dinyatakan dengan angka-angka. Induksi magnetik B dinyatakan sebagai kerapatan garis medan. Kerapatan garis medan didefinisikan sebagai banyaknya garis medan yang menembus suatu bidang secara tegak lurus persatuan luas. Coba Anda perhatikan gambar berikut.

Dengan menggunakan ungkapan kerapatan garis medan, nilai B pada sebuah titik tertentu dapat dinyatakan sebagai berikut.



Gambar 3.32

Fokus garis medan menembus tegak lurus suatu bidang

$$B = \frac{\Phi}{A} \text{ atau } \Phi = BA$$

Oleh karena B bersatuan Wbm^{-2} dan luas A bersatuan m^2 , satuan fluks adalah weber. Persamaan di atas berlaku untuk medan magnet B yang tegak lurus pada bidang atau sejajar dengan garis normal pada bidang. Jika kerapatan garis gaya medan magnetnya membentuk sudut θ terhadap garis normal bidang, persamaan fluks magnetiknya akan menjadi

$$\Phi = BA \cos \theta$$

Dengan θ adalah sudut yang dibentuk oleh induksi magnetik B terhadap garis normal bidang.

$$B = \frac{\Phi}{A} \text{ atau } \Phi = BA$$

Jadi, sebenarnya persamaan menyatakan bahwa besarnya fluks magnetik pada sebuah titik sama dengan hasil kali induksi magnetic di titik itu dengan luas bidang yang ditembus oleh kerapatan garis medan secara tegak lurus. Fluks magnetik merupakan besaran skalar.



Gambar 3.33

Arus yang terbentuk pada jarum galvanometer menunjukkan bahwa magnet jika digesekkan bolak-balik dalam kumparan dapat menimbulkan arus listrik

Contoh Soal 3.6

Garis gaya medan magnet $B = 10^{-2} \text{ Wbm}^{-2}$ menembus tegak lurus bidang seluas 10 cm^2 . Tentukanlah besar fluks magnetiknya.

Jaaban:

Diketahui:

$$B = 10^{-2} \text{ Wbm}^{-2}$$

$$A = 10 \text{ cm}^2 = 10^{-3} \text{ m}^2$$

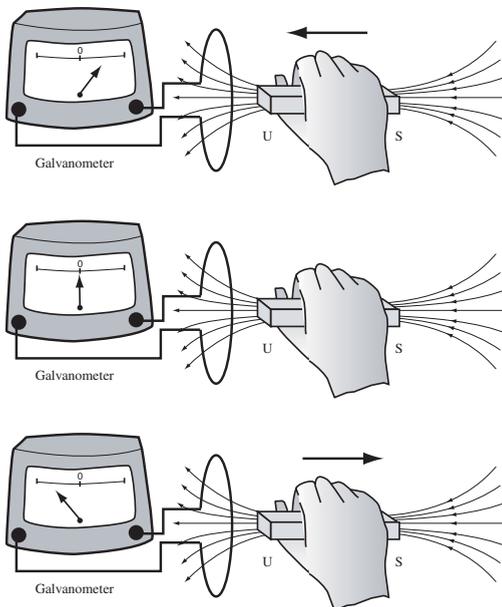
$$\theta = 0$$

Karena $B \perp A$, berarti B membentuk sudut nol terhadap garis normal.

$$\begin{aligned} \Phi &= BA \cos \theta = (10^{-2} \text{ Wbm}^{-2}) (10^{-3} \text{ m}^2) (\cos 0) \\ &= 10^{-5} \text{ weber} \end{aligned}$$

1. Hukum Faraday dan Hukum Lenz

Sebuah magnet batang digerakkan mendekati kumparan dengan kutub utara menghadap pada kumparan. Ketika magnet sedang bergerak, jarum galvanometer menyimpang. Hal ini menunjukkan bahwa suatu arus telah dihasilkan dalam kumparan tersebut.

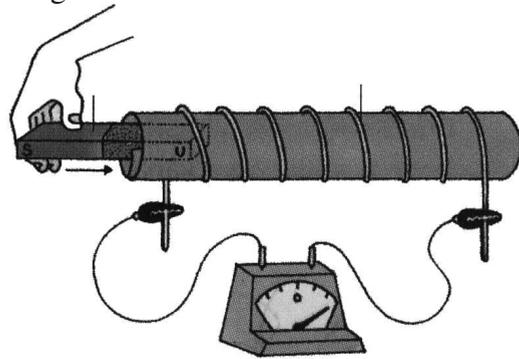


Gambar 3.34

Penyimpangan jarum galvanometer

Penyimpangan jarum galvanometer pada eksperimen itu menunjukkan bahwa dalam rangkaian timbul arus listrik. Arus listrik dapat timbul jika ada beda potensial.

Beda potensial ini ditimbulkan oleh adanya perubahan fluks magnetik yang dinamakan gaya gerak listrik induksi (GGL induksi), sedangkan arus yang timbul disebut arus induksi. Arah arus induksi yang timbul karena adanya perubahan fluks magnetik dalam kumparan dapat ditentukan dengan menggunakan Hukum Lenz. Menurut Hukum Lenz, arah arus induksi dalam suatu penghantar adalah sedemikian rupa sehingga menghasilkan medan magnet yang arahnya melawan perubahan garis gaya yang menyebabkannya. Jadi, ketika magnet mendekati kumparan, jumlah garis gaya yang dilingkupinya bertambah sehingga timbul arus induksi. Medan magnet yang ditimbulkan arus induksi berlawanan arah dengan medan magnet dari magnet batang.



Gambar 3.35

Eksperimen hukum Lenz

Jika Anda tinjau dari gambar di atas, timbulnya arus listrik pada kumparan sesuai dengan Hukum Lenz. Pada saat kutub U magnet batang didekatkan pada ujung kumparan A, ujung kumparan A akan menjadi kutub magnet U dan ujung kumparan B akan menjadi kutub magnet S. Dengan demikian, kumparan AB bersifat magnetik.

Untuk menentukan arah arusnya dapat digunakan aturan sebagai berikut. Ibu jari sebagai arah kutub U pada kumparan dan jari-jari lainnya dilipatkan sebagai arah arus listrik. Dengan menggunakan aturan tersebut dapat ditentukan arah arus dalam kumparan.

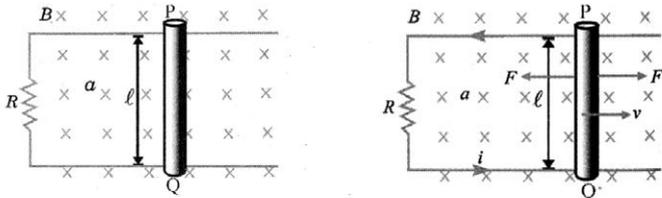
Jika kumparan dijauhi oleh kutub U dari magnet batang, ujung kumparan A menjadi kutub magnet S dan ujung kumparan B menjadi kutub magnet U.

Ini berarti bahwa jika didekati oleh kutub magnet apa pun, kumparan akan memberikan gaya tolak, sedangkan jika dijauhi oleh kutub magnet apa pun, kumparan itu akan

memberikan gaya tarik. Inilah penemuan awal dari Hukum Lenz untuk menentukan arah arus dalam kumparan.

a. GGL Induksi pada Kawat Dalam Medan Magnet

Coba Anda perhatikan gambar berikut ini.



Gambar 3.36

- a) Kawat penghantar PQ disusun sejauh s dalam medan magnet B .
- b) Target batang ditarik ke luar kumparan.

Bagaimanakah cara untuk mendapatkan arus induksi pada sebuah konduktor PQ? Medan magnet homogen dengan rapat garis gaya B , arahnya tegak lurus masuk bidang kertas. Sebuah penghantar PQ dapat digerakkan bebas ke kiri ataupun ke kanan pada kawat melengkung berbentuk U. Jika penghantar PQ digerakkan ke kanan dengan kecepatan v dan sejauh s , akan terjadi perubahan jumlah garis gaya yang dilingkupi oleh penghantar PQ dengan kawat U sehingga akan timbul arus induksi pada rangkaian.

Arah arus induksi pada PQ dan kawat, dapat ditentukan dengan menggunakan Hukum Lenz. Arah medan magnet B masuk dan arah kecepatan v ke kanan maka muatan positif pada batang PQ mendapat gaya ke atas dari Q ke P, sedangkan muatan negatif mendapat gaya ke bawah dari P ke Q. Arah arus listrik sesuai dengan arah muatan positif sehingga arus induksi mengalir dari Q ke P. Oleh karena arah arus ke atas (dari Q ke P), akan timbul pula gaya Lorentz F yang arahnya ke kiri (dicaridengan kaidah tangan kanan).

Persamaan besar gaya Lorentz dapat ditulis sebagai berikut.

$$F = Bil$$

Agar kecepatan penghantar PQ konstan, pada PQ harus diberikan gaya sebesar F' untuk melawan gaya Lorentz F atau $F' = -F$. Untuk mempertahankan kecepatan v , gaya F'

sama besar dengan gaya Lorentz F ke kanan. Penghantar PQ berpindah sejauh s , dengan kecepatan v dalam waktu t . Besarnya usaha yang harus dilakukan untuk melawan gaya Lorentz adalah sebagai berikut.

$$W = F's$$

Usaha yang dilakukan berubah menjadi energi listrik yang besarnya sebagai berikut.

$$W = -Fs = -Bil s$$

Usaha itu berubah menjadi energi listrik. Besarnya energi listrik yang dihasilkan

$$W = \epsilon it$$

Berdasarkan hukum kekekalan energi maka persamaan $W = -Fs = -Bil s$ akan sama dengan persamaan $W = \epsilon it$

$$\epsilon it = -Bil s$$

$$\epsilon t = -Bil s \Rightarrow \epsilon = -Bl \frac{s}{t}$$

Jarak tempuh (s) per satuan waktu (t) adalah kecepatan (v) sehingga besarnya GGL induksi yang dihasilkan oleh kawat PQ adalah

$$\epsilon = -Bl v$$

Tanda negatif (-) menunjukkan persesuaian arah gaya gerak listrik induksi dengan Hukum Lenz.

Apabila sebuah penghantar dengan panjang l dan memiliki hambatan R digerakkan dengan kecepatan v dalam induksi magnetik homogen B , besarnya gaya perlawanan yang diberikan oleh penghantar memenuhi persamaan

$$F = Bil, \text{ dengan } i = \frac{\epsilon}{R}$$

Telah diketahui bahwa $\epsilon = Bl v$ sehingga didapatkan

$$F = B \left(\frac{\epsilon}{R} \right) l = B \left(\frac{Bl v}{R} \right) l$$

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

Dengan ϵ adalah beda potensial antara P dan Q yang disebut GGL induksi.

Contoh Soal 3.7

Induksi magnetik homogen $B = 5 \times 10^{-2} \text{ Wbm}^{-2}$ tegak lurus masuk bidang kertas. Kertas PQ dengan panjang 2 m diegrakkan ke kanan dengan kecepatan 20 m/s. Tentukanlah GGL induksi yang timbul pada kawat PQ.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$B = 5 \times 10^{-2} \text{ Wbm}^{-2}$$

$$l = 2 \text{ m}$$

$$v = 20 \text{ m/s}$$

Maka, diperoleh

$$\varepsilon = Blv = (5 \times 10^{-2} \text{ Wbm}^{-2})(2 \text{ m})(20 \text{ m/s}) = 2 \text{ volt}$$

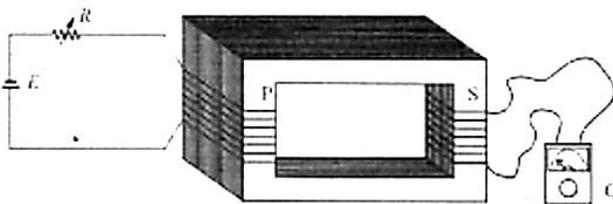
Jadi, GGL induksi pada kawat PQ sebesar 2 volt dengan arah arusnya dari Q ke P.

a. GGL Induksi karena Perubahan Fluks Magnetik

Hukum Faraday yang menyatakan bahwa besarnya gaya gerak listrik bergantung pada kecepatan perubahan fluks magnetic. Ini berarti bahwa

- 1) jika jumlah fluks magnetik yang memasuki kumparan berubah, pada ujung-ujung kumparan akan timbul GGL induksi;
- 2) besarnya GGL induksi bergantung pada laju perubahan fluks dan banyaknya lilitan pada kumparan.

Coba Anda tinjau kembali gambar berikut ini.



Setelah PQ bergeser sejauh ds , besarnya perubahan fluks magnetik yang terjadi adalah

$$d\Phi = BdA$$

$$d\Phi = Bl ds$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = Bl \frac{ds}{dt} = Blv$$

Dari persamaan $\varepsilon = -Blv$ sehingga akan berlaku persamaan

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

Untuk N lilitan persamaannya menjadi

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

Apabila perubahan fluks magnetiknya konstan terhadap waktu, persamaannya dapat menjadi

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

Tanda (-) menyatakan arah arus induksi seperti yang

dijelaskan oleh Hukum Lenz. Jika $\frac{d\Phi}{dt}$ positif, ε bernilai negatif. Ini berarti arah arus fluks magnetik induksi

berlawanan dengan arah fluks magnetic utama. Jika $\frac{d\Phi}{dt}$ negatif, bernilai positif. Ini berarti, arah fluks magnetic induksi searah dengan arah fluks magnetik utama.

Contoh Soal 3.8

Jika suatu kumparan dengan 2.000 lilitan berada dalam medan magnet. Apabila pada suatu kumparan terjadi perubahan fluks magnetik sebesar 2×10^{-4} weber dalam waktu 0,02 sekon, tentukanlah besarnya gaya gerak listrik induksi yang timbul pada ujung-ujung kumparan itu. Tentukan pula arah arus induksi yang terjadi.

Jawab:

Diketahui:

$$N = 2.000 \text{ lilitan}$$

$$\Phi = \text{weber}$$

$$t = 0,02 \text{ sekon}$$

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} = -2.000 \frac{2 \times 10^{-4}}{0,02} = 20 \text{ volt}$$

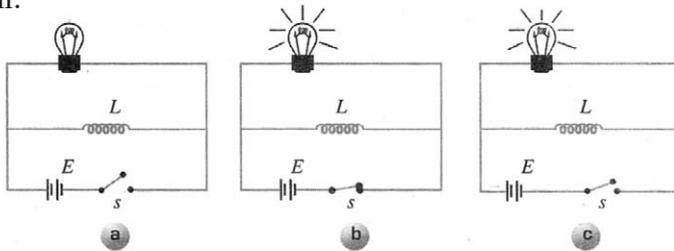
Jadi, GGL induksi yang timbul pada ujung-ujung kumparan adalah 20 volt.

3. Induktansi

Istilah “induktansi” seringkali Anda mendengarnya, namun kita sering tidak mengetahui istilah ini. Induktansi itu sendiri artinya “imbasan”. Kita akan membahas mengenai induktansi atau imbasan dalam suatu medan magnetik. Dalam pembahasan induktansi taua imbasan ini kita akan membahas 2 jenis induktansi, yaitu:

a. Induktansi Diri

Coba Anda perhatikan rangkaian listrik tertutup berikut ini.



Gambar 3.37

Rangkaian pada saat
a. saklar s terbuka lampu pada;
b. saklar s ditutup, lampu menyala.
c. saklar s ditutup, lampu padam.

Suatu rangkaian tertutup yang terdiri atas sebuah lampu, induktor L , dan sumber tegangan E dilengkapi dengan sakelar s . Pada awalnya, sakelar s dalam keadaan terbuka **Gambar (a)** dan lampu dalam keadaan padam. Kemudian, sakelar s ditutup pada **Gambar (b)** dan secara perlahan-lahan lampu menyala. Pada saat arusnya diputus lagi, lampu tetap menyala beberapa saat, kemudian menjadi padam lagi (**Gambar (c)**). Peristiwa ini menunjukkan timbulnya arus induksi yang disebabkan oleh adanya perubahan fluks magnetik pada induktor.

Dari peristiwa di atas diperoleh bahwa perubahan arus pada sebuah kumparan dapat menimbulkan GGL induksi. Besarnya GGL induksi ini berbanding lurus dengan kecepatan perubahan kuat arusnya pada kumparan. Jika perubahan arusnya konstan, persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

$$\varepsilon = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

Untuk perubahan yang kecil, persamaannya akan menjadi

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

dengan:

$\varepsilon =$ GGL induksi diri (volt)

$L =$ induktansi diri kumparan (henry)

$\frac{di}{dt}$

$=$ kecepatan perubahan kuat arus (As^{-1})

Tanda (-) merupakan penyesuaian dari Hukum Lenz.

Contoh Soal 3.9

Dalam sebuah kumparan dengan 2.000 lilitan dan induktansi diri 0,1 H, mengalir arus listrik sebesar 200 mA dan kemudian berubah menjadi 80 mA dalam waktu 0,02 sekon. Tentukanlah GGL induksi yang timbul pada kumparan tersebut.

Jawaban:

Diketahui:

$N = 2.000$ lilitan

$i_1 = 200 \text{ mA} = 0,2 \text{ A}$

$t = 0,02$

$L = 0,1 \text{ H}$

$i_2 = 80 \text{ mA} = 0,08 \text{ A}$

Dengan menggunakan persamaan

$$\varepsilon = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad \varepsilon = (-0,1 \text{ H}) \left(\frac{0,08 \text{ A} - 0,2 \text{ A}}{0,02 \text{ s}} \right) = 0,6 \text{ V}$$

Induksi diri berharga 1 henry adalah besarnya induktansi yang dimiliki sebuah kumparan apabila pada kumparan timbul GGL induksi sebesar 1 volt yang diakibatkan oleh adanya perubahan kuat arus satu ampere dalam waktu satu sekon. Oleh karena kecepatan perubahan kuat arus

$\left(\frac{di}{dt} \right)$ ditentukan oleh kecepatan perubahan fluks magnetic

$\left(\frac{d\Phi}{dt} \right)$, besar induktansi dari suatu kumparan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan

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

GGL induksi yang ditimbulkan oleh perubahan fluks magnetik sama dengan GGL induksi yang ditimbulkan oleh perubahan arus sehingga akan diperoleh persamaan

$$-N \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

$$Nd\Phi = Ldi$$

$$N \int d\Phi = L \int di$$

$$N\Phi = Li$$

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

dengan:

L = induktansi diri kumparan (henry)

N = jumlah lilitan kumparan

Φ = fluks magnetik kumparan

i = kuat arus kumparan (ampere)

Apabila sebuah induktor dilalui oleh arus listrik, besarnya energi listrik yang dapat dimanfaatkan (tersimpan dalam) inductor sama dengan energi listrik yang diambil oleh induktor

$$U = W = Vit$$

Ketika pengisian inductor, arus berubah dari $0 \rightarrow i$ dalam selang waktu dt . Energi yang dimanfaatkan menjadi

$$dW = Vidt, \text{ dengan } V = \varepsilon = -L \frac{di}{dt}$$

Oleh sebab itu, akan diperoleh

$$dW = L \frac{di}{dt} idt = Lidi$$

Kemudian, kedua ruas kiri dan kanan diintegrasikan sehingga diperoleh

$$\int dW = L \int idi$$

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

dengan:

W = energi yang diambil oleh inductor (J)

U = energi yang tersimpan dalam inductor (J)

L = induktansi diri (H)

i = kuat arus yang melalui inductor (A)

Induksi magnetic pada suatu toroida telah diturunkan, coba Anda lihat kebalik pembahasan mengenai induksi magnetic pada toroida. Induksi magnetic suatu toroida memenuhi persamaan sebagai berikut.

$$B = \mu_0 i n = \mu_0 i \frac{N}{l}$$

Flusk magnetic dalam suatu toroida dirumuskan sebagai berikut.

$$\Phi = BA$$

Dengan cara mensubstitusikan harga induksi magnetic B pada persamaan tersebut akan diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\Phi = \mu_0 i \frac{N}{l} A$$

$$L = \frac{N\Phi}{i} \Rightarrow \Phi = \frac{Li}{N}$$

Dari persamaan

$$\Phi = \frac{Li}{N} \quad \text{dan} \quad \Phi = \mu_0 i \frac{N}{l} A$$

Dari persamaan . Maka, akan diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\frac{Li}{N} = \mu_0 i \frac{N}{l} A$$

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

dengan:

L = induktansi diri (H)

μ_0 = permeabilitas magnetic untuk ruang hampa ($4\pi \times 10^{-7} \text{ WbA}^{-1}\text{m}^{-1}$)

N = jumlah lilitan

l = panjang toroida (m)

A = luas penampang (m^2)

Contoh Soal 3.10

Jika sebuah toroida dengan luas penampang 8 cm^2 dan panjang 80 cm memiliki 800 buah lilitan. Tentukanlah induktansi toroida.

Jawaban:

Diketahui:

$$A = 8 \text{ cm}^2 = 8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$N = 800 \text{ lilitan}$$

$$l = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$$

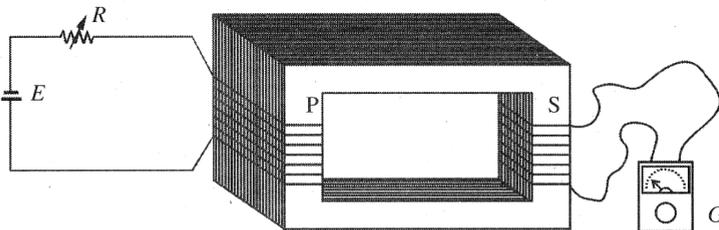
$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ WbA}^{-1}\text{m}^{-1}$$

Maka,

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$
$$= \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ WbA}^{-1}\text{m}^{-1})(800 \text{ lilitan})^2 (8 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}{(0,8 \text{ m})}$$
$$= 25,6\pi \times 10^{-6} \text{ henry} = 25,6\pi \mu\text{H}$$

a. Induktansi Silang

Coba Anda perhatikan gambar di bawah ini, kumparan primer (P) dihubungkan dengan sumber tegangan (E) dan hambatan variabel (R), sedangkan kumparan sekunder (S) dihubungkan dengan sebuah galvanometer (G). Apabila pada kumparan primer dilakukan perubahan kuat arus dengan mengubah-ubah harga R , akan terjadi perubahan fluks magnetic pada kumparan primer. Perubahan pada kumparan primer ini akan menimbulkan perubahan fluks magnetic pada kumparan sekunder dan akan menimbulkan GGL induksi. Jadi, peristiwa ini disebut induktnasi silang atau induksi timbal-balik.



Gambar 3.38

Kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan dan kumparan sekunder dengan galvanometer

Besarnya GGL induksi yang timbul pada kumparan sekunder karena pengaruh perubahan fluks magnetik Φ pada kumparan primer dalam waktu dt adalah sebagai berikut

$$\varepsilon_1 = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt}$$

GGL pada bagian kumparan sekunder ini juga dapat ditentukan karena pengaruh arus di kumparan primer sebesar di_1 dalam waktu dt .

$$\varepsilon_2 = -M \frac{di_1}{dt}$$

M didefinisikan sebagai induktansi silang sehingga dari

persamaan $\varepsilon_1 = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt}$ dan $\varepsilon_2 = -M \frac{di_1}{dt}$ akan diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$M \frac{di_1}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi_1}{dt} \rightarrow M di_1 = N_2 d\Phi_1$$

Apabila kedua ruas kiri dan kanan dari persamaan tersebut diintegrasikan akan diperoleh persamaan berikut ini.

$$M \int di_1 = N_2 \int d\Phi_1$$

$$M i_1 = N_2 \Phi_1 \rightarrow M = \frac{N_2 \Phi_1}{i_1}$$

dengan:

$\Phi_1 =$ fluks magnetic yang dilingkupi oleh sekunder dan ditimbulkan oleh primer

$i_1 =$ kuat arus primer

$M =$ induktansi silang

$N_2 =$ jumlah lilitan sekunder

Induktansi silang (M) dapat juga ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$M = \frac{N_1 \Phi_2}{i_2}$$

Jadi, induktansi silang dapat dibuat persamaannya sebagai berikut.

$$M = -\frac{\varepsilon_2}{\frac{di_1}{dt}} \text{ dan } M = -\frac{\varepsilon_1}{\frac{di_2}{dt}}$$

4. GGL Induksi pada Generator

Dari pembahasan yang lalu, Anda sudah memahami cara menimbulkan arus induksi seperti yang dikemukakan Faraday, yaitu dengan menggerakkan konduktor dalam medan magnet. Kamu juga telah melakukan pengamatan dengan cara menggerakkan magnet keluar masuk konduktor yang berbentuk kumparan sehingga timbul arus induksi pada konduktor.

Dari pendapat Faraday dan pengamatan yang telah kamu lakukan maka dapat disimpulkan bahwa baik kumparan ataupun magnet yang digerakkan sama-sama menghasilkan arus induksi. Perubahan energi yang terjadi adalah dari energi mekanik menjadi energi listrik. Prinsip perubahan energi seperti inilah yang menjadi dasar pembuatan dinamo dan generator. **Generator** adalah mesin yang mengubah energi gerak/kinetik menjadi energi listrik. Generator yang berukuran kecil disebut **dinamo**. Untuk memahami cara kerja dinamo atau generator sehingga dapat menghasilkan arus listrik, ikuti penjelasan berikut ini.

Pada prinsipnya, generator akan lebih efisien apabila kumparannya yang dibuat berputar dalam medan magnet tetap sehingga fluks magnet yang menembus kumparan itu berubah-ubah secara periodik. Besarnya GGL induksi yang dihasilkan sesuai dengan jumlah lilitan kumparan yang digunakan serta laju perubahan fluks magnet yang menembus kumparan itu.

Sesuai dengan arah arus induksi yang dihasilkan, generator dikelompokkan menjadi dua, yaitu generator yang menghasilkan arus bolak-balik dan generator yang menghasilkan arus searah. Generator yang menghasilkan arus bolak-balik disebut generator AC atau alternator. AC berasal dari kata *alternating current* yang artinya arus bolak-balik. Generator yang menghasilkan arus searah disebut juga generator DC, yang berasal dari kata *direct current* yang artinya arus searah.

Perbedaan antara generator arus bolak-balik dengan generator arus searah adalah pada bentuk cincin lucurnya. Generator arus bolak-balik memiliki dua cincin luncur yang masing-masing dihubungkan dengan ujung-

ujung kumparan, sedangkan generator arus searah hanya memiliki satu cincin yang terbelah di bagian tengahnya dan disebut **cincin belah** atau **komutator**. Komponen generator yang bergerak disebut **rotor** dan yang diam disebut **stator**.

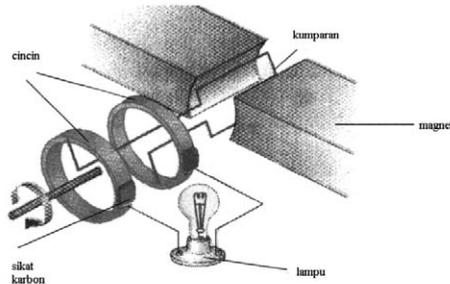
Jika sebuah kumparan penghantar digerakkan dalam medan magnet dan memotong garis-garis gaya magnet pada akumpran tersebut akan timbul GGL induksi yang memenuhi persamaan sebagai berikut.

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

Persamaan tersebut telah diperkenalkan oleh Faraday dalam menentukan GGL induksi pada sebuah kumparan.

a. Generator Arus Bolak-Balik (AC)

Coba kamu perhatikan gambar generator AC berikut ini.



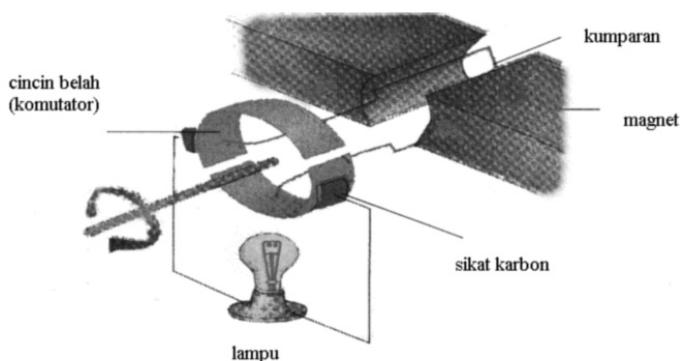
Gambar 3.39

Generator arus bolak-balik (AC)

Pada generator arus bolak-balik (AC), kumparan dibuat berputar dalam medan magnet yang diam. Apabila kumparan diputar, timbullah GGL induksi pada ujung-ujung kumparan yang dihubungkan dengan cincin-cincin generator. Arus listrik mengalir melalui sikat-sikat yang terbuat dari karbon yang dihubungkan dengan cincin-cincin generator. Selama kumparan berputar, arus listrik yang dihasilkan adalah arus bolak-balik. Bagian generator yang berputar disebut **rotor**, sedangkan bagian yang diam disebut **stator**.

a. Generator Arus Searah (DC)

Sebuah generator arus searah (DC) sederhana ditunjukkan pada gambar berikut ini.



Gambar 3.40
Generator arus searah (DC)

Berbeda dengan generator AC yang memiliki dua cincin, generator DC hanya memiliki satu cincin yang terbelah di tengahnya sehingga dinamakan cincin belah atau komutator.

Salah satu belahan komutator selalu berpolaritas positif dan belahan komutator yang lain berpolaritas negatif. Hal ini menyebabkan arus listrik induksi yang mengalir melalui rangkaian luar (lampu) selalu memiliki satu arah, yaitu dari komutator berpolaritas positif melalui lampu ke komutator berpolaritas negatif. Arus listrik semacam ini dinamakan arus searah atau DC (*Direct Current*).

c. Dinamo Sepeda

Dinamo sepeda menggunakan magnet yang berputar dekat kumparan.

Magnet permanen berputar di dekat sebuah kumparan diam yang dililitkan pada inti besi. Akibat perputaran magnet, garis-garis gaya magnet yang memotong kumparan berubah-ubah. Hal ini menyebabkan timbulnya GGL induksi pada ujung-ujung kumparan sehingga menghasilkan arus listrik induksi. Arus listrik induksi akan mengalir melalui lampu sepeda. Makin cepat sepeda dikayuh maka makin besar laju perubahan garis-garis gaya magnetnya sehingga arus listrik induksi yang dihasilkan makin besar dan lampu tampak menyala lebih terang.

5. Transformator

Apakah transformator itu? Dalam kehidupan sehari-hari tentunya kamu sering mendengar atau mungkin telah menggunakan transformator. Transformator adalah alat yang digunakan untuk mengubah tegangan bolak-balik (AC) dari satu nilai tertentu menjadi nilai yang diinginkan.



Gambar 3.41

Dinamo sepeda

Transformator atau trafo terdiri dari pasangan kumparan primer dan sekunder yang terpisah dan dililitkan pada inti besi lunak. Kumparan primer berfungsi sebagai *input* dan kumparan sekunder berfungsi sebagai *output*. Prinsip dasar cara kerja transformator adalah hukum induksi Faraday. Kumparan primer dihubungkan ke suatu sumber arus bolak-balik yang besar arus listriknya senantiasa berubah terhadap waktu. Arus pada kumparan primer ini bekerja seolah-olah mengalirkan atau memutuskan arus searah secara berulang-ulang sehingga terjadi perubahan garis-garis gaya magnet yang memotong kumparan sekunder. Akibatnya, timbul GGL induksi dalam kumparan sekunder yang berfungsi sebagai *output* dengan mengalirkan arus listrik induksi. Dengan menentukan jumlah lilitan yang sesuai untuk tiap kumparan, dapat dihasilkan GGL kumparan sekunder yang berbeda dengan GGL pada kumparan primer.

Bagaimanakah hubungan antara tegangan dengan jumlah lilitan kumparan pada sebuah transformator? Untuk memperoleh jawaban dari pertanyaan tersebut, coba kamu lakukan percobaan berikut ini.

Eksperimen 3.3

Tujuan Eksperimen:

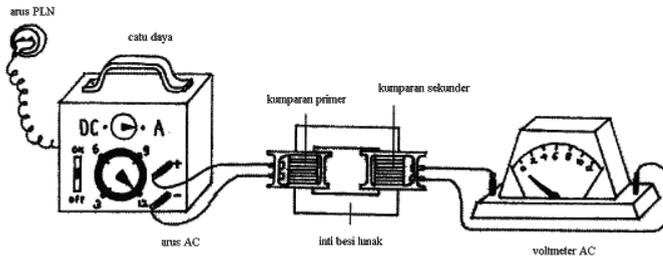
Menyelidiki hubungan antara tegangan dengan jumlah lilitan kumparan pada sebuah transformator.

Alat dan Bahan:

Sebuah inti besi lunak, sebuah kumparan 1.000 lilitan, dua buah kumparan 500 lilitan, sebuah kumparan 250 lilitan, sebuah catu daya sebagai sumber tegangan AC, sebuah voltmeter AC 0–100 V, serta kabel penghubung secukupnya.

Langkah-langkah Eksperimen:

1. Coba kamu rangkai alat seperti pada gambar berikut.



Gunakan kumparan primer 500 lilitan dan kumparan sekunder juga 500 lilitan.

2. Hubungkan kumparan primer dengan sumber tegangan AC dari catu daya 12 volt. Coba amati dan catat angka yang ditunjuk oleh jarum voltmeter sebagai tegangan keluaran.

No.	Lilitan Primer (N_p)	Lilitan Sekunder (N_s)	Tegangan Primer (V_p)	Tegangan Sekunder (V_s)
1.	500 lilitan	500 lilitan	12 volt	... V
2.	500 lilitan	1.000 lilitan	12 volt	... V
3.	500 lilitan	500 lilitan	12 volt	... V

3. Ganti kumparan sekunder berturut-turut dengan kumparan 1.000 lilitan dan kumparan 250 lilitan. Catat tegangan keluaran tiap kumparan tersebut.

Pertanyaan:

Coba diskusikan bersama teman-teman Anda dan buatlah kesimpulannya.

Hasil pengamatan menunjukkan hal-hal sebagai berikut.

1. Besarnya tegangan induksi pada kumparan sekunder bergantung pada besarnya tegangan pada kumparan primer.

2. Besarnya tegangan induksi sebanding dengan jumlah lilitan. Makin banyak jumlah lilitan kumparan sekunder maka makin besar tegangannya.
3. Perbandingan antara tegangan sekunder dengan tegangan primer sama dengan perbandingan jumlah lilitan kumparan sekunder dengan jumlah lilitan kumparan primer.
Hubungan tersebut dapat ditulis secara matematis sebagai berikut.

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

dengan:

V_s = tegangan sekunder (volt)

V_p = tegangan primer (volt)

N_s = lilitan sekunder (lilitan)

N_p = lilitan primer (lilitan)

Bagaimanakah hubungan antara perbandingan tegangan, perbandingan kuat arus, dan perbandingan jumlah lilitan sebuah transformator? Untuk memperoleh jawaban dari pertanyaan tersebut, coba lakukan percobaan berikut bersama teman-teman Anda.

Contoh Soal 3.11

Sebuah tarfo *step-up* kumparan primernya terdiri atas 50 lilitan dan kumparan sekundernya 100 lilitan. Jika tegangan primernya 110 V, berapakah tegangan pada kumparan sekundernya?

Jawab:

Ditanyakan: $V_s = ?$

Jawab:

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

$$\frac{110 \text{ V}}{V_s} = \frac{50 \text{ lilitan}}{100 \text{ lilitan}}$$

$$\frac{110 \text{ V}}{V_s} = \frac{1}{2}$$

$$V_s = 110 \text{ V} \cdot 2 = 220 \text{ V}$$

Jadi, tegangan pada kumparan sekunder adalah 220 V.

1. Persamaan Trafo untuk Transformator Ideal

Apakah jumlah energi yang masuk sama dengan jumlah energi yang keluar? Menurut hukum kekekalan energi,

apabila transformator itu adalah transformator ideal maka jumlah energi yang masuk ke dalam sebuah transformator sama dengan jumlah energi yang keluar dari transformator itu. Akibatnya, daya listrik yang ada pada kumparan primer (P_p) adalah sama dengan daya listrik yang ada pada kumparan sekunder (P_s). Dengan demikian, secara matematis dapat ditulis:

$$P_p = P_s$$

Karena $P_p = V_p I_p$ dan $P_s = V_s I_s$

Maka,

$$V_p I_p = V_s I_s$$

Keterangan:

P_p = daya pada kumparan primer (watt)

P_s = daya pada kumparan sekunder (watt)

Contoh Soal 3.12

Sebuah trafo step-down dihubungkan dengan sumber tegangan 220 V. Trafo ini digunakan untuk menyalakan lampu bertegangan 10 V. Jika kuat arus listrik yang melalui lampu 4 A, berapakah kuat arus listrik yang melalui kumparan primer?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$V_p = 220 \text{ V}$$

$$V_s = 10 \text{ V}$$

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

Ditanyakan:

$$I_p = ?$$

Jawab:

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

$$\frac{220 \text{ V}}{10 \text{ V}} = \frac{4 \text{ A}}{I_p}$$

$$22 = \frac{4 \text{ A}}{I_p}$$

$$I_p = 0,182 \text{ A}$$

Jadi, arus listrik yang melewati kumparan primer adalah 0,182 A.

2. Efisiensi Transformator (Rendemen)

Inti transformator terbuat dari pelat-pelat besi. Ketika suatu tegangan bolak-balik dihubungkan pada transformator maka akan dihasilkan garis-garis gaya magnet yang selalu berubah. Hal ini dapat menyebabkan timbulnya arus pusat pada inti transformator. Inti transformator terbuat dari besi yang bersifat sebagai penghantar yang memiliki hambatan listrik sehingga timbul kehilangan energi dalam bentuk kalor. Selain itu, kumparan primer dan sekunder yang terbuat dari kawat tembaga dan bersifat sebagai penghantar dengan nilai hambatan listrik tertentu juga menimbulkan kehilangan energi dalam bentuk kalor.

Dalam transformator selalu timbul kalor sehingga energi listrik yang keluar dari transformator selalu lebih kecil daripada energi listrik yang masuk ke transformator. Sebagian energi listrik itu berubah menjadi kalor. Keadaan ini merupakan sesuatu yang tidak dapat dihindarkan.

Efisiensi transformator didefinisikan sebagai perbandingan antara daya listrik yang keluar dari transformator dengan daya listrik yang masuk ke transformator.

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{daya output}}{\text{daya input}} \times 100\%$$

$$h = \frac{P_s}{P_p} \times 100\% \quad \text{atau} \quad h = \frac{V_s' I_s'}{V_p' I_p} \times 100\%$$

Transformator adalah alat atau mesin yang sangat efisien. Efisiensi transformator dapat mencapai 99%.

Contoh Soal 3.13

Sebuah transformator memiliki tegangan primer 220 V dan tegangan sekunder 110 V. Apabila kuat arus yang mengalir melalui tegangan primer sebesar 0,2 A, ternyata kuat arus yang mengalir pada kumparan sekunder menjadi 0,3 A. Berapakah efisiensi transformator itu?

Jawaban:

Diketahui:

$$V_p = 220 \text{ V}$$

$$V_s = 110 \text{ V}$$

$$I_p = 0,2 \text{ A}$$

$$I_s = 0,3 \text{ A}$$

Ditanyakan:

$$h = ?$$

Jawab:

$$h = \frac{V_s' I_s'}{V_p' I_p'} 100\%$$

$$h = \frac{100 \text{ V}' 0,3 \text{ A}'}{220 \text{ V}' 0,2 \text{ A}} 100\%$$

$$h = 75\%$$

Jadi, efisiensi transformator adalah 75%.

Ringkasan

Medan magnet adalah ruang disekita magnet tempat magnet lain atau benda lain yang dapat dipengaruhi magnet mengalami gaya magnet.

Besarnya induksi magnetik disebuah titik karena pengaruh kawat lurus panjang d yang berarus listrik memenuhi persamaan.

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

Induksi magnetik dipusat lingkaran memenuhi persamaan.

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

Induksi magnetik pada sumbu solenoida, di tengah solenoida

$$B = \frac{\mu_0 i}{2a} \sin^3 \alpha$$

Di ujung solenoida.

$$B = \mu_0 in \quad \text{atau} \quad B = \frac{\mu_0 iN}{\ell}$$

Induksi magnetik pada sumbu toroida memenuhi persamaan

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

Besarnya gaya lorentz yang dialami penghantar dengan panjang ℓ yang dialiri

arus listrik i dalam medan magnet homogen B memenuhi persamaan

$$F = Bi\ell \sin\theta$$

Gaya Lorentz yang dialami muatan listrik q yang bergerak dengan kecepatan v dalam medan induksi magnetik B adalah

$$F = qvB \sin\theta$$

Jari-jari lintasan sebuah partikel yang bergerak di dalam medan magnet homogen memenuhi persamaan

$$R = \frac{mv}{qB}$$

Besarnya gaya timbal balik antara satu kawat dan kawat yang lain per satuan panjang adalah

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi a}$$

Pada bahan ferromagnetik, seperti besi, atom-atom yang bersifat magnetik berkumpul dalam kelompok-kelompok kecil yang disebut domain. Suhu ketika domain magnetik mulai hilang disebut **suhu Curie**.

Fluks magnetik didefinisikan sebanyak garis gaya magnetik yang menembus suatu luas daerah tertentu dalam arah tegak lurus dengan fluks magnetik

$$\Phi = BA \cos\theta$$

Menurut **hukum Faraday**, gaya gerak listrik induksi yang terjadi dalam suatu rangkaian besarnya berbanding lurus dengan kecepatan perubahan fluks magnetik yang dilingkupinya.

$$\varepsilon = -B\ell v \quad \text{atau} \quad \varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Besarnya GGL induksi yang disebabkan perubahan arus suatu kumparan/solenoida berbanding lurus dengan cepat perubahan kuat arusnya.

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

Besarnya energi listrik pada induktor yang dialiri arus I adalah

Persamaan induktansi diri pada toroida adalah

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

Motor listrik mengubah energi listrik menjadi energi gerak. Momen gaya atau torsi yang timbul pada kumparannya memenuhi persamaan

$$\tau = -NABi \sin \Phi$$

Generator adalah alat yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. GGL induksi yang dihasilkan memenuhi persamaan

$$\tau = -NBA\omega \sin \omega t$$

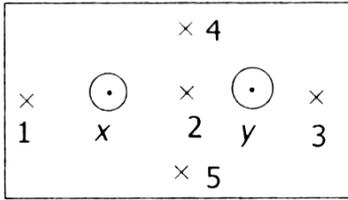
Tes Kompetensi Bab 3

A. Pilihlah satu jawaban yang benar

- Besar kuat medan magnetik di suatu titik yang letaknya sejauh r dari suatu penghantar lurus yang dialiri arus I adalah sebanding dengan
 - I
 - rI
 - r/I
 - I/r
 - $1/rI$
- Kawat berarus listrik memanjang dari barat ke timur. Apabila arah arus listrik pada kawat tersebut dari barat, arah medan magnet pada titik-titik yang berada di atas kawat akan menuju ke
 - timur
 - bawah
 - utara
 - selatan
 - barat
- Sebuah kawat yang berbentuk lingkaran dengan jari-jari L dialiri arus listrik I . Besarnya kuat medan magnetic pada pusat lingkaran itu adalah
 - tidak bergantung pada L
 - sebanding dengan L^2
 - berbanding terbalik dengan L
 - berbanding lurus dengan L
 - berbanding terbalik L^2
- Tempat kedudukan titik-titik yang memiliki besar induksi magnetic yang sama dari sebuah kawat lurus panjang berarus listrik adalah berupa
 - garis lurus
 - lingkaran
 - dua garis sejajar
 - kulit silinder
 - kulit bola
- Dua kawat sangat panjang dipasang vertical sejajar dengan jarak d , Kawat pertama dialiri arus sebesar I ke atas. Titik P (dalam bidang kedua kawat itu) yang terletak di antaranya dan berjarak $1/3d$ dari kawat pertama. Jika induksi magnetic di titik P besarnya nol, ini berarti arus yang mengalir dalam kawat kedua adalah
 - $1/3$ ke bawah
 - $1/2$ ke bawah
 - $3I$ ke atas
 - $2I$ ke atas
 - $2I$ ke bawah
- Dua kawat lurus sejajar masing-masing arusnya $i_1 = 3 \text{ A}$ dan $i_2 = 12 \text{ A}$ searah. Jarak antara kedua kawat 30 cm . Tentukanlah letak sebuah titik yang berada di antara kedua kawat yang memiliki induksi magnetic nol (diukur dari kawat pertama).
 - 6 cm
 - 8 cm
 - 9 cm
 - 12 cm
 - 24 cm
- Suatu partikel bermuatan $0,04 \text{ C}$ bergerak sejajar dengan kawat berarus listrik 10 A . Jika jarak partikel ke kawat 5 cm , kelajuan partikel 5 m/s dan $\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \text{ Tm/A}$. Maka, gaya yang dialami partikel-partikel tersebut adalah ... $\mu \text{ N}$.
 - 0
 - 2
 - 4
 - 6
 - 8
- Sebuah toroida memiliki jari-jari lingkaran efektif 10 cm . Banyaknya lilitan pada toroida tersebut 400 lilitan. Apabila dialiri arus listrik sebesar 5 A , induksi magnetic pada sumbu toroida adalah
 - $0,5 \text{ mT}$
 - $1,0 \text{ mT}$
 - $2,0 \text{ mT}$
 - $2,5 \text{ mT}$
 - $4,0 \text{ mT}$
- Suatu muatan positif $0,2 \text{ C}$ bergerak dengan kecepatan 2 m/s dalam medan magnetic yang besarnya 5 Wb/m^2 . Arah kecepatan muatan itu sejajar dengan arah medan magnetic. Gaya yang dialami muatan tersebut
 - nol
 - $0,08 \text{ N}$
 - $0,5 \text{ N}$
 - 2 N
 - 50 N
- Sebuah kawat beraus listrik 2 A berada dalam medan magnet homogen 10^{-4} Wb/m^2 . Jika panjang kawat 5 m dan arah arus berlawanan arah dengan arah medan magnetiknya, gaya Lorentz yang mempengaruhi kawat tersebut sebesar

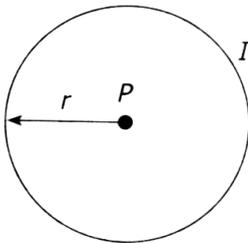
- a. nol
 b. 10^{-2} N
 c. 10^{-3} N
 d. 10^{-4} N
 e. 10^{-5} N

11. Perhatikan gambar berikut ini.



x dan y adalah dua kawat yang dialiri arus sama, dengan arah menuju pembaca. Agar tidak dipengaruhi oleh medan magnetik, sejauh kompas harus diletakkan di titik

- a. 5
 b. 4
 c. 3
 d. 2
 e. 1
12. Dua partikel $q_1 : q_2$ dan $m_1 : m_2 = 1 : 4$ bergerak memotong secara tegak lurus medan magnet homogen dengan kelajuan sama. Perbandingan jari-jari kelengkungan pertama dan kedua adalah
- a. 1 : 1
 b. 1 : 2
 c. 2 : 1
 d. 1 : 8
 e. 8 : 1
13. Perhatikan gambar berikut.



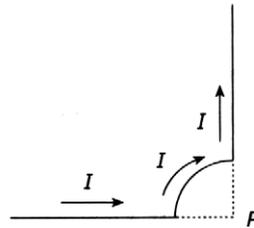
Sebuah loop arus berbentuk lingkaran berjari-jari r dialiri arus I yang menimbulkan medan induksi (imbas) magnetik B di pusatnya P seperti pada gambar di atas. Besar dan arah B tersebut adalah

- a. $\frac{\mu_0 I}{2r}$, tegak lurus keluar bidang gambar
 b. $\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$, tegak lurus keluar bidang gambar
 c. $\frac{\mu_0 I}{2\pi r}$, tegak lurus masuk bidang gambar
 d. $\frac{\mu_0 I}{2r}$, tegak lurus masuk bidang gambar
 e. nol

- d. $\frac{\mu_0 I}{2r}$, tegak lurus masuk bidang gambar
 e. nol

14. Jika sebuah kawat digerakkan sedemikian rupa sehingga memotong garis-garis gaya suatu medan magnet pada kedua ujung kawat itu timbul gaya gerak listrik induksi. Kaidah itu dirumuskan oleh
- a. Maxwell
 b. Lenz
 c. Foucault
 d. Ampere
 e. Faraday

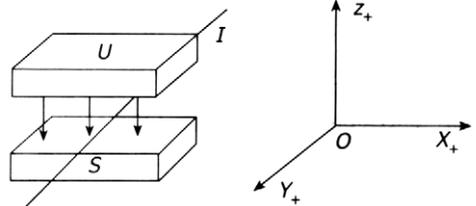
15. Perhatikan gambar berikut ini.



Kawat $\frac{1}{2}$ lingkaran dengan jari-jari 3 meter dialiri arus 6 ampere. Besar induksi magnetik pada pusat lingkaran (P) adalah

- a. $\pi \times 10^{-5}$
 b. $\pi \times 10^{-7}$
 c. $4\pi \times 10^{-5}$
 d. $4\pi \times 10^{-7}$
 e. $7\pi \times 10^{-7}$
16. Berdasarkan Hukum Faraday, satuan weber induksi dengan
- a. volt per meter
 b. watt per meter
 c. ampere per sekon
 d. volt sekon
 e. ampere sekon

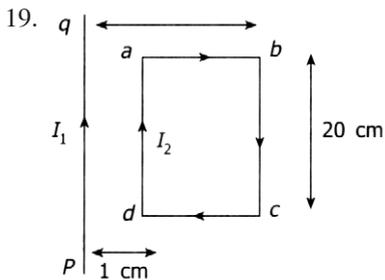
17.



Sepotong kawat berarus listrik I dengan arah sejajar sumbu Y , berada di antara kutub magnet. Kawat akan mendapat gaya Lorentz ke arah

- a. sumbu X_+
 b. sumbu Y_+
 c. sumbu X_-
 d. sumbu Z_+
 e. sumbu Z_-

18. Tentukan besarnya GGL induksi pada kumparan sekunder, jika induktansi timbale balik kumparan tersebut 0,01 henry dan pada kumparan primernya terjadi perubahan arus listrik sebesar 5 A dalam selang waktu 0,1 sekon.
- a. 0,5 V d. 5,0 V
 b. 1,5 V e. 50 V
 c. 2,5 V



Pada gambar di atas terlukis bahwa kawat lurus pq dilalui arus listrik sebesar $I_1 = 10$

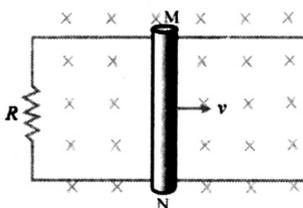
A dan kawat empat persegi panjang abcd dilalui arus $I_2 = 5A$. Resultan gaya yang dialami kawat empat persegi panjang abcd sebesar ... mikronewton.

- a. 20
 b. 60
 c. 120
 d. 180
 e. 220
20. Sebuah kumparan dengan induktansi 0,5 H dialiri arus listrik yang merupakan fungsi waktu, menurut persamaan $i = (10 + 4t)$ ampere, dengan t dalam sekon. Besarnya GGL induksi pada kumparan adalah
- a. 2 V
 b. 4 V
 c. 5 V
 d. 6 V
 e. 8 V

B. Soal Uraian

Jawablah pertanyaan-pertanyaan dibawah ini dengan benar.

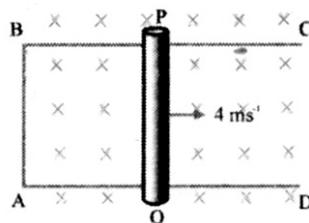
- Dua penghantar I dan III sejajar beraus dengan gaya yang dialami masing-masing penghantar per satuan panjang F_1 . Jika pada penghantar I arus dinaikkan 4 kali semula dan jarak kedua penghantar menjadi $\frac{1}{2}$ kali semula, gaya pada masing-masing penghantar menjadi F_2 . Tentukan perbandingan besar gaya F_1 dan F_2 .
- Sebuah toroida dengan jari-jari 6 cm terdiri atas 800 lilitan. Berapakah arus yang mengalir pada toroida agar induksi magnetic yang terjadi dalam toroida adalah $4 \times 10^{-3} \text{ Wb/m}^2$?
- Perhatikan gambar berikut.



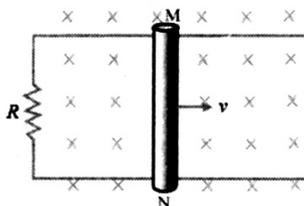
Kawat MN panjangnya 40 cm digerakkan dalam medan magnet homogen $B = 10^{-2}$

T dengan kecepatan 20 m/s. Jika hambatan dalam rangkaian $R = 5 \text{ ohm}$, tentukanlah besar dan arah gaya Lorentz yang bekerja pada kawat MN.

- Sebuah solenoida memiliki induktansi 500 mH. Tentukanlah besar GGL induksi diri yang dibangkitkan dalam kumparan itu jika terdapat perubahan arus listrik dari 200 mA menjadi 50 mA dalam waktu -2 sekon secara beraturan.
- Dari gambar berikut jika induksi magnetic 0,2 T dan kawat PQ dengan panjang 40 cm digeser ke kanan, tentukanlah GGL Induksi yang ditimbulkan serata arah arus induksinya.



- Sebuah kumparan memiliki induktansi $0,4\text{ H}$. Jika dalam waktu $1/6$ sekon arusnya berubah dari 70 mA menjadi 120 mA , berapakah besar GGL induksi dirinya?
- Perhatikan gambar berikut.



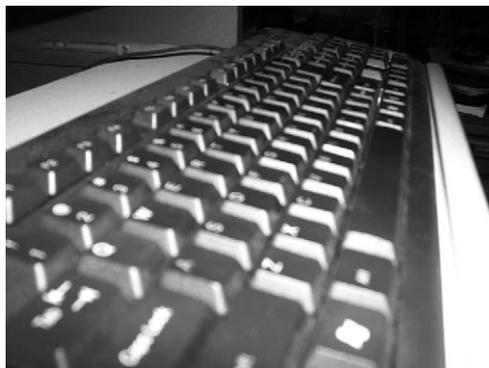
Kawat MN digerakkan pada medan magnet homogen B dengan kecepatan v arah ke kanan. Tentukanlah arah gaya Lorentz yang dialami oleh MN.

- Sebuah kawat membentuk menjadi $4/5$ lingkaran dengan jari-jari 10 cm . Hitunglah induksi magnetik di titik P yang berada di pusat lingkaran jika arus yang mengalir pada kawat 18 A .
- Pada sebuah inductor dengan 50 lilitan mengalir arus yang selalu berubah-ubah terhadap waktu yaitu sebesar $0,05\text{ A/s}$ dan perubahan fluks magnetik yang ditimbulkannya sebesar $0,01\text{ W}$. Tentukanlah:
 - induktansi diri kumparan tersebut;
 - GGL induksi pada ujung-ujung kumparan.
- Dua buah kawat lurus, panjang, dan sejajar berada pada jarak 40 cm dan masing-masing dialiri arus listrik 6 A dan $3,5\text{ A}$ berlawanan arah. Tentukanlah letak titik P yang memiliki induktansi magnetik nol.

Physics in Action

Elektromagnet Superkonduktor

Dalam superkonduktor tidak terdapat hambatan yang menghalangi aliran muatan listrik. Oleh sebab itu, tidak ada energi yang terbuang meskipun arus sangat besar. Elektromagnet yang menggunakan gulungan superkonduktor dapat menghasilkan medan magnet yang sangat kuat dan juga ekonomis. Di Fermilab dekat Chicago, elektromagnet superkonduktor telah memberikan keuntungan bagi laboratorium tersebut karena penggunaan listrik yang sebelumnya boros dan mahal menjadi murah serta efisien.



Aplikasi lain dari penemuan superkonduktor adalah penemuan kendaraan maglev atau “*magneticall levited*”. Pada gambar diperlihatkan bentuk model dari kendaraan maglev. Maglev memanfaatkan kumparan superkonduktor dan medan magnet. Kendaraan ini akan bergerak sekitar 6 inchi atau 15 cm di atas rel. Suatu hari kamu akan dapat menumpang kendaraan ini dengan cepat dan lancar tanpa gangguan dari satu kota ke kota lainnya.

Bab 4



Sumber: Biology: Exploring Life, 1994

Rangkaian Arus dan Tegangan Bolak-Balik

Generator arus bolak-balik akan menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik. Generator arus bolak-balik berfungsi mengubah energi kinetik menjadi energi listrik dan menghasilkan tegangan listrik bolak-balik.

Tahukah Anda, apakah arus dan tegangan bolak-balik itu? Pada bab ini, Anda akan mempelajari lebih dalam mengenai arus dan tegangan bolak-balik. Anda juga akan mempelajari beberapa komponen-komponen listrik, diantaranya resistor, induktor, dan kapasitor, serta rangkaian yang menggunakan komponen-komponen listrik tersebut.

Standar Kompetensi

Menerapkan konsep kelisrikan dan kemagnetan dalam berbagai penyelesaian masalah dan produk teknologi

Kompetensi Dasar

Mengomunikasikan konsep induksi Faraday dan arus bolak-balik serta penerapannya

- A. Arus dan Tegangan Bolak-Balik
- B. Resistor, Induktor, dan Kapasitor dalam Rangkaian AC
- C. Resistor dan Induktor Seri
- D. Resistor dan Kapasitor Seri
- E. Rangkaian R-L-C
- F. Daya pada Rangkaian Arus Bolak-Balik

A. Arus dan Tegangan Bolak-Balik

Pada bab sebelumnya Anda pernah mempelajari listrik statis yang membahas arus dan tegangan yang selalu memiliki nilai tetap, tidak berubah terhadap waktu yang disebut arus dan tegangan DC (*Direct Current*). Adapun arus dan tegangan bolak-balik adalah arus dan tegangan yang nilainya selalu berubah terhadap waktu secara periodik. Besaran seperti ini disebut arus dan tegangan bolak-balik atau AC (*Alternating Current*).

Apabila pada arus searah Anda dapat mengetahui nilai dan tegangannya yang selalu tetap. Maka, pada arus bolak-balik Anda akan dapat mengetahui nilai maksimum yang dihasilkan dan frekuensi osilasi yang dihasilkan oleh sumbernya.

1. Arus dan Tegangan Sinusoidal

Sumber arus bolak-balik adalah generator arus bolak-balik. Generator arus bolak-balik terdiri dari sebuah kumparan persegi panjang yang diputar dalam medan magnetik homogen. Gaya gerak listrik yang dihasilkan oleh generator berubah secara periodik menurut fungsi sinus atau cosinus. GGL sinusoidal ini dihasilkan oleh sebuah kumparan yang berputar dengan laju sudut tetap.

Tegangan yang dihasilkan berupa tegangan sinusoidal dengan persamaan sebagai berikut.

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

dapat dituliskan menjadi

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

dengan ε_m adalah gaya gerak listrik maksimum = $NBA\omega$

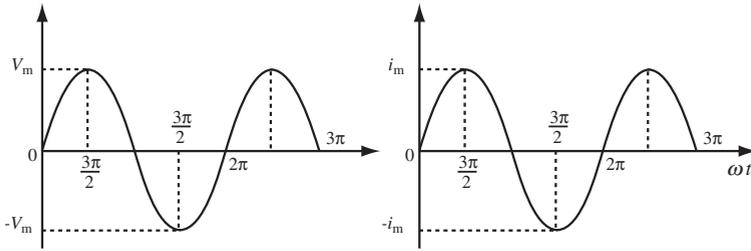
N = jumlah lilitan kumparan

A = luas kumparan

B = besarnya induksi magnetik

ω = frekuensi sudut putaran kumparan

Bentuk tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh sebuah gaya generator listrik AC dapat ditunjukkan pada gambar berikut ini.



Gambar 6.1

- Grafik sinusoida dari tegangan listrik bolak-balik.
- Grafik sinusoida dari arus listrik bolak-balik

Grafik yang dihasilkan oleh sumber arus bolak-balik tersebut berbentuk sinusoidal atau dikenal sebagai fungsi sinus waktu. Oleh karena itu, tegangan dan arus bolak-balik yang dihasilkan dapat dituliskan sebagai berikut.

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

$$i = i_m \sin \omega t$$

Dari persamaan tegangan dan arus listrik di atas, tegangan dan arus listrik memiliki sudut fase sama, yaitu sebesar

ωt atau $2\pi f = \frac{2\pi t}{T}$ karena $f = \frac{1}{T}$. Fase dari persamaan

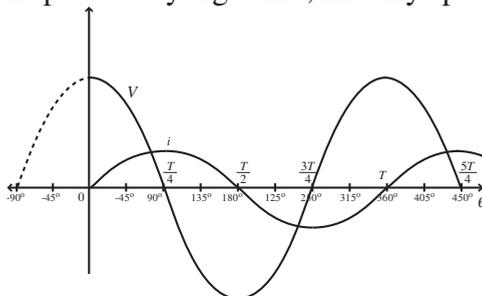
tersebut adalah $\frac{t}{T}$ karena fase (ϕ) adalah sudut fase (θ) dibagi dengan 2π .

Arus dan tegangan listrik yang memiliki fase sama disebut sefase. Jika antara tegangan dan arus listrik terdapat beda sudut fase sebesar ϕ , persamaannya menjadi

$$V = V_m \sin(\omega t + \phi) \text{ dan } i = i_m \sin \omega t$$

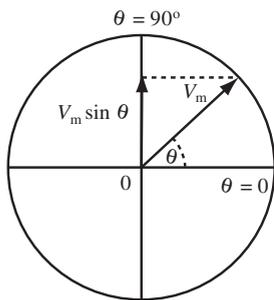
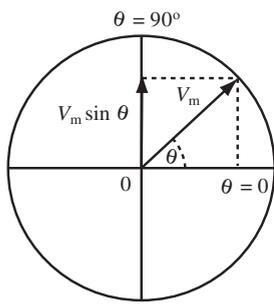
Tegangan dan arus listrik memiliki beda fase π atau beda fase $\frac{\pi}{2}$.

Coba Anda perhatikan beda sudut fase antara V dan i , nilai V dan i pada saat yang sama, misalnya pada saat $\theta =$



Gambar 4.2

Grafik arus dan tegangan sinusoida. Anda dapat mengetahui benda sudut fase dengan memperhatikan nilai i dan v pada saat yang sama



Gambar 4.2

- a. Fesor untuk tegangan V
 b. Fesor untuk arus i

0. Pada saat $t = 0$, V sudah mencapai nilai maksimum, sedangkan i baru mulai beralih dari nol menuju nilai positif. Ini berarti, V telah mendahului i sebesar 90° .

Selain menggunakan sudut fase, sumbu horizontal juga dapat dianggap sebagai sumbu waktu (t). Pada saat $t = 0$, V telah mencapai maksimum dan i akan mencapai maksimum pada saat $t = T/4$. V mendahului i dengan $1/4$ periode ($T/4$) karena satu periode sama dengan 360° atau sehingga beda sudut fasenya menjadi $360^\circ/4 = 90^\circ = \pi/2$.

2. Diagram Fesor

Untuk menganalisis tegangan atau arus bolak-balik digunakan diagram fesor. Kata ‘fesor’ berasal dari bahasa Inggris “phasor” yang disingkat dari kata-kata “phase vector” yang artinya vektor fase. Fesor adalah sebuah gambar anak panah yang digunakan untuk menyatakan tegangan atau arus bolak-balik.

Sebagai contoh,

$$V = V_m \sin \omega t \rightarrow \overset{i}{V} = V_m \angle \theta$$

$$i = i_m \sin \omega t \rightarrow \overset{i}{i} = i_m \angle \theta$$

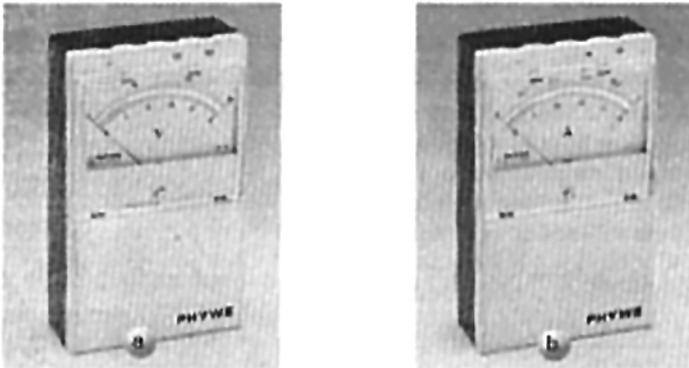
dengan $\overset{i}{V}$ = fesor tegangan, $\overset{i}{i}$ = arus fesor, dan $\omega t = \theta$ yang menyatakan sudut fase dan arah fesor. V_m atau i_m menyatakan besarnya (panjang vektor) fesor tersebut.

Proyeksi nilai V atau i pada sumbu vertikal adalah untuk menentukan nilai tegangan atau arus listrik dan sumbu horizontal diukur dalam satuan derajat atau radian ($2\pi = 360^\circ$).

1. Alat Ukur Tegangan dan Arus Bolak-Balik

Tegangan listrik searah diukur dengan voltmeter DC dan arus searah diukur dengan amperemeter DC. Adapun tegangan dan arus listrik bolak-balik diukur dengan voltmeter C dan amperemeter AC. Dengan menggunakan alat ukur voltmeter atau amperemeter AC besaran yang terukur adalah nilai **rms** (*root mean square*) = akar rata-

rata kuadrat arus = $\sqrt{i^2}$; = rata-rata dari atau nilai efektif dari tegangan atau arus.



Gambar 4.2

- a. Voltmeter
- b. Amperemeter

Untuk melihat bentuk tegangan atau arus sinusoidal yang dihasilkan oleh sumber bolak-balik dapat digunakan alat ukur osiloskop. Sumbu vertikal menunjukkan nilai tegangan atau arus yang dihasilkan oleh sumber bolak-balik dan sumbu horizontalnya menunjukkan waktu. Dari monitor osiloskop dapat ditentukan nilai maksimum dari tegangan atau arus listriknya dan dari sumbu horizontal dapat ditentukan periode atau frekuensi dari sumber bolak-baliknya. Monitor dari sebuah osiloskop terbagi-bagi menjadi baris-baris dan kolom-kolom sehingga membentuk sebuah kotak.

Perhatikan gambar berikut!

Jika sumbu vertikal diatur pada tegangan 2 V/cm, waktu dalam arah horizontal menunjukkan 10 ms/cm dan tiap kotak memiliki ukuran 1 cm × 1 cm. Tentukanlah:

- a. tegangan maksimum sumber AC;
- b. frekuensi sumber AC.

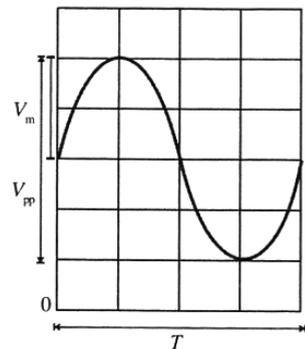
Penyelesaian:

- a. Dari gambar dapat dilihat tegangan dari puncak ke puncak

$$V_{pp} = 4 \text{ cm} \times 2 \text{ V/cm} = 8 \text{ volt}$$

$$V_m = \frac{1}{2} V_{pp} = \frac{1}{2} (8 \text{ volt}) = 4 \text{ volt}$$

Jadi, tegangan maksimumnya 4 volt.



Gambar 4.2

Bentuk sinoseida pada layar osiloskop

b. Periode dari gelombang sinusoidal yang dihasilkan

adalah:

$$T = 4 \text{ cm} \times 2 \text{ V/cm} = 4 \text{ volt}$$

$$T = 80 \times 10^{-3} \text{ s} = 80 \times 10^{-2} \text{ s}$$

Frekuensi getarnya

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

4. Nilai Efektif

Tegangan arus listrik pada rangkaian tegangan bolak-balik selalu berubah secara periodik sehingga menimbulkan sebuah pertanyaan, nilai apa yang terukur apabila Anda mengukur arus bolak-balik memakai amperemeter AC. Ternyata alat ukur amperemeter dan voltmeter AC mengukur harga efektif dari arus listrik dan tegangan bolak-balik. Oleh sebab dalam keperluan besaran listrik yang memiliki harga tetap maka dalam tegangan bolak-balik ditetapkan harga efektif. Karena harga efektif memiliki nilai tetap. Harga efektif arus dan tegangan bolak-balik adalah kuat arus dan tegangan bolak-balik yang dianggap setara dengan arus dan tegangan searah yang menghasilkan jumlah kalor yang sama ketika melalui suatu pengantar dalam waktu yang sama.

Dalam waktu $1/2T$ (setengah periode) energi berupa kalor yang dihasilkan oleh arus efektif adalah

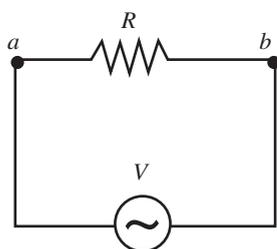
$$W_{ef} = i_{ef}^2 \cdot R \cdot \frac{1}{2} T$$

Energi yang dihasilkan oleh arus bolak-balik yang harganya berubah secara periodik dalam waktu $1/2 T$ adalah

$$W_{ac} = \int_0^{\frac{1}{2}T} i^2 \cdot R \cdot dt$$

Jika $W_{ef} = W_{ac}$. Maka, persamaannya akan diperoleh $W_{ef} = W_{ac}$

$$i_{ef}^2 \cdot R \cdot \frac{1}{2} T = \int_0^{\frac{1}{2}T} i^2 \cdot R \cdot dt$$



Gambar 4.2

Rangkaian listrik yang memiliki hambatan R dialiri arus listrik bola-balik dengan tegangan V_{ac} .

$$\begin{aligned}
i_{ef}^2 \cdot \frac{1}{2} T &= \int_0^{\frac{1}{T}} i^2 dt, \text{ jika } i = i_m \sin \omega t \\
i_{ef}^2 \cdot \frac{1}{2} T &= \int_0^{\frac{1}{T}} i_m^2 \sin^2 \omega t dt = i_m^2 \int_0^{\frac{1}{T}} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt \\
i_{ef}^2 \cdot \frac{1}{2} T &= i_m^2 \int_0^{\frac{1}{T}} \frac{(1 - \cos 2\omega t) dt}{2} \\
&= i_m^2 \left[\int_0^{\frac{1}{T}} \frac{1}{2} dt - \int_0^{\frac{1}{T}} \frac{1}{2} \cos 2\omega t dt \right] \\
i_{ef}^2 \cdot \frac{1}{2} T &= \frac{1}{2} i_m^2 \left[\int_0^{\frac{1}{T}} dt - \int_0^{\frac{1}{T}} \cos 2\omega t dt \right] \\
&= i_m^2 \left[\frac{1}{2} t \Big|_0^{\frac{1}{T}} - \left(\frac{1}{2\omega} \sin 2\omega t \right) \Big|_0^{\frac{1}{T}} \right] \\
i_{ef}^2 \cdot \frac{1}{2} T &= i_m^2 \left[\frac{1}{4} T - \left(\frac{T}{4\pi} \sin \frac{4\pi}{T} t \right) \Big|_0^{\frac{1}{T}} \right] \\
&= i_m^2 \left[\frac{1}{4} T - \left(\frac{T}{4\pi} \sin 2\pi - \frac{4\pi}{T} \sin 0 \right) \right]
\end{aligned}$$

$$W_{ef} = W_{ac} \quad i_{ef}^2 \cdot \frac{1}{2} T = i_m^2 \left(\frac{1}{4} T - 0 \right) = i_m^2 \cdot \frac{1}{4} T$$

Kedua ruas kiri dan kanan dibagi dengan $1/2T$. Maka, akan diperoleh;

$$i_{ef}^2 = \frac{1}{2} i_m^2$$

Jadi, hubungan antara i_{ef} dan i_m ditunjukkan pada persamaan

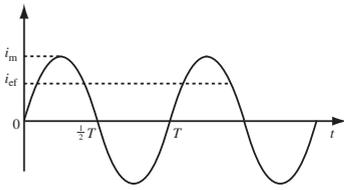
$$i_{ef} = \frac{i_m}{\sqrt{2}}$$

i_{ef} adalah arus efektif dan i_m adalah arus maksimum dari sumber arus bolak-balik.

Hubungan antara tegangan efektif dan tegangan maksimum antara lain sebagai berikut.

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

Pada tegangan arus searah yang terukur oleh amperemeter DC dan voltmeter DC adalah harga dari arus dan tegangan yang tetap. Akan tetapi, pada alat-alat ukur listrik tegangan bolak-balik seperti amperemeter AC dan voltmeter AC yang terukur adalah harga efektif dari arus dan tegangan bolak-balik tersebut. Harga efektif dari arus atau tegangan disebut juga rms. Sebab,



Gambar 4.2

Nilai efektif arus berada di bawah nilai maksimum arus

$$V_{ef} = \sqrt{\overline{V^2}}; \overline{V^2} = \text{nilai rata-rata } V^2 = \frac{1}{T} \int_0^T V^2 dt = \frac{1}{2T} \int_0^T V^2 dt$$

$$i_{ef} = \sqrt{\overline{i^2}}; \overline{i^2} = \text{nilai rata-rata } i^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{1}{2T} \int_0^T i^2 dt$$

Contoh Soal 4.1

Sebuah amperemeter digunakan untuk mengukur beda tegangan pada rangkaian bolak-balik. Angka yang ditunjukkan adalah 200 mA, tentukan arus maksimumnya!

Penyelesaian:

Alat ukur listrik (amperemeter) menunjukkan nilai efektif.

$$i_{ef} = 200 \text{ mA}$$

Jadi, arus maksimum yang dihasilkan adalah

$$i_m = i_{ef} \cdot \sqrt{2}$$

$$i_m = 200 \cdot \sqrt{2}$$

5. Harga Rata-rata

Selain harga efektif dari tangkian arus bolak-balik dapat ditentukan nilai rata-ratanya.

Nilai rata-rata arus bolak-balik adalah kuat arus bolak-balik yang harganya setara dengan kuat arus searah yang memindahkan sejumlah muatan listrik yang sama dalam

waktu yang sama. Untuk dapat mengetahui nilai rata-rata dari suatu arus listrik coba Anda lihat grafik berikut ini.

Grafik sinusoidal dalam waktu $1/2T$, muatan yang dilewatkan oleh arus searah dalam waktu $1/2T$ tersebut adalah

$$q_{ac} = i_r \frac{1}{2} T$$

Jumlah muatan yang dilewatkan oleh arus bolak-balik dalam waktu setengah periode adalah sama dengan luas

grafik dengan batas-batas $0 \leq t \leq \frac{1}{2} T$. Luas daerah tersebut dapat dicari dengan memakai persamaan sebagai berikut.

$$q_{ac} = \int_0^{\frac{1}{2} T} i_m \sin \omega t$$

Definisi untuk setengah periode = arus rata-rata dalam setengah periode

$$q_{ac} = \frac{1}{2T} \int_0^{\frac{1}{2} T} i_m \sin \omega t = \frac{q_{ac}}{\frac{1}{2} T}$$

$$q_{ac} = \int_0^{\frac{1}{2} T} i_m \sin \omega t$$

Persamaan dan

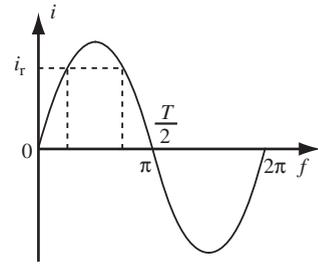
$$q_{ac} = \frac{1}{2T} \int_0^{\frac{1}{2} T} i_m \sin \omega t = \frac{q_{ac}}{\frac{1}{2} T}$$

memiliki nilai yang sama

sehingga:

$$i_r \cdot \frac{1}{2} T = \int_0^{\frac{1}{2} T} i_m \omega t = i_m \int_0^{\frac{1}{2} T} \sin \frac{2\pi}{T} t$$

$$i_r \cdot \frac{1}{2} T = i_m \left(-\frac{1}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t \right) \Big|_0^{\frac{1}{2} T} = i_m \left(-\frac{\pi}{2\pi} \cos \frac{2\pi}{T} t \right) \Big|_0^{\frac{1}{2} T}$$



Gambar 4.2

Nilai rata-rata arus dapat dipantulkan dari grafik sinusoidal dalam waktu $\frac{1}{2} T$.

$$i_r \cdot \frac{1}{2} T = i_m \left(-\frac{T}{2\pi} \cos \pi + \frac{T}{2\pi} \cos 0 \right) = i_m \left(\frac{T}{2\pi} + \frac{T}{2\pi} \right)$$

$$i_r \cdot \frac{1}{2} T = i_m \frac{T}{\pi}$$

Sehingga nilai arus rata-rata akan menjadi:

$$i_r = \frac{2i_m}{\pi}$$

Sehingga nilai arus rata-rata akan menjadi:

$$i_r = \frac{2i_m}{\pi}$$

Hubungan tegangan rata-rata dengan tegangan maksimum adalah

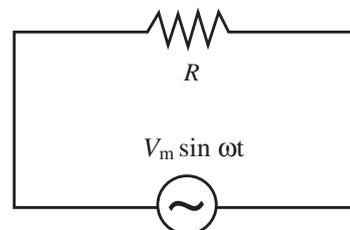
$$V_r = \frac{2V_m}{\pi}$$

Nilai rata-rata arus dan tegangan untuk setengah periode ini tidak sama dengan nilai rata-rata satu periode, sebab rata-rata satu periode bernilai nol.

B. Resistor, Induktor, dan Kapasitor dalam Rangkaian AC

1. Rangkaian Arus Bolak-Balik untuk Resistor Murni

Apabila sebuah resistor R dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik. Perhatikan gambar berikut ini.



Gambar 4.9

Sebuah resistor R dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik

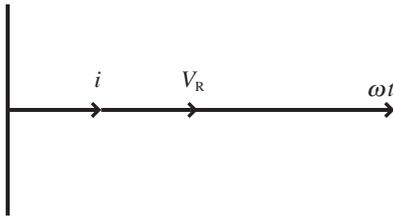
Beda tegangan listrik V_{ab} akan memenuhi persamaan sebagai berikut.

$$V_{ab} = V_m \sin \omega t$$

Arus listrik yang melalui R akan memenuhi persamaan:

$$i = \frac{V_{ab}}{R} = \frac{V_m}{R} \sin \omega t \quad \text{karena} \quad i_m = \frac{V_m}{R} \quad \text{Maka,} \quad i = i_m \sin \omega t$$

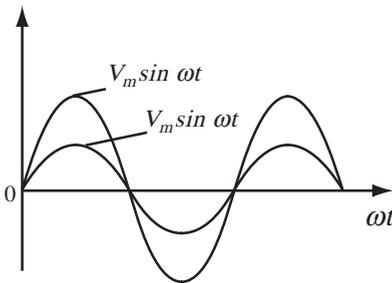
Diagram fasor tegangan V dan arus i untuk rangkaian resistor murni akan tampak seperti gambar berikut.



Gambar 4.10

Diagram fasor resistor murni

Persamaan $V_{ab} = V_m \sin \omega t$ dan $i = i_m \sin \omega t$ memiliki sudut fase sama atau sefase. Apabila bentuk tegangan dan arusnya digambarkan pada sebuah grafik akan diperoleh gambar sebagai berikut.



Gambar 4.11

Grafik sinusoidal untuk tegangan (v) dan arus (i) sefase

2. Rangkaian Arus Bolak-Balik untuk Induktor Murni

Sebuah induktor murni (kumparan) dengan induktansi diri L dilalui oleh arus $i = i_m \sin \omega t$. Maka, tegangan V_{ab} antara ujungnya sama dengan negatif GGL yang timbul dalam induktor tersebut. Ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

Penurunan Hukum Kirchhoff bahwa $V_{ab} = \sum iR - \sum \mathcal{E}$. Oleh sebab induktor ini dianggap murni, $R = 0$ maka $V_{ab} = -\mathcal{E}$. Selanjutnya,

$$V_{ab} = -\varepsilon = -\left(-L \frac{di}{dt}\right) = L \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt} (i_m \sin \omega t)$$

$$= i_m \omega L \cos \omega t$$

$$V_{ab} = V_m \sin\left(\omega t + \frac{1}{2}\pi\right)$$

dengan $V_{abmaks} = i_m \omega L$

ωL berdimensi dengan hambatan R , juga satuan SI-nya ohm. ωL disebut reaktansi induktif dari induktor tersebut dengan lambang X_L , dimana $X_L = \omega L = 2\pi fL$ dan $V_{abmaks} = i_m X_L$.

Coba Anda perhatikan kembali persamaan $i = i_m \sin \omega t$

dan $V_{ab} = V_m \sin\left(\omega t + \frac{1}{2}\pi\right)$. Maka, teramatinya adanya keterlambatan arus terhadap tegangan atau fasa tegangan mendahului arus pada rangkaian yang mengandung

induktor. Sudut fasa arus listrik terlambat sebesar $\frac{1}{2}\pi$ dibandingkan dengan tegangan listrik.

$i = i_m \sin \omega t$ dan $V_{ab} = V_m \sin\left(\omega t + \frac{1}{2}\pi\right)$, fase tegangan

mendahului arus $\frac{1}{2}\pi$ atau jika $V = V_m \sin \omega t$ maka

$$i = i_m \sin\left(\omega t - \frac{1}{2}\pi\right)$$

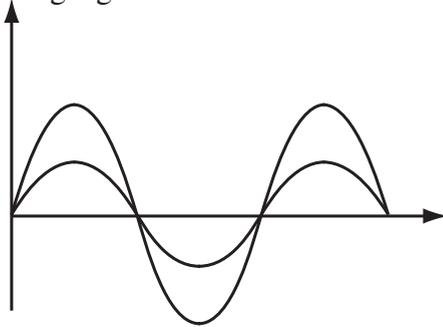
Arus (i) terlambat $\frac{1}{2}\pi$ terhadap tegangan (V).

Dari persamaan $i = i_m \sin \omega t$ dan $V_{ab} = V_m \sin\left(\omega t + \frac{1}{2}\pi\right)$

juga diperoleh tegangan V dan arus mempunyai beda fase $\frac{1}{2}\pi$. Artinya, tegangan mendahului arus dengan beda fase

$\frac{1}{2}\pi$. Jika dibuat diagram fasornya perhatikan gambar berikut.

Diagram fasor dapat digunakan untuk menyatakan hubungan antara tegangan dan arus serta untuk menyata-



Gambar 4.11

Grafik sinusoidal untuk rangkaian yang memiliki L saja

kan beda fase antara keduanya. Apabila pada rangkaian hanya terdapat L saja, V_L dengan i_L akan memiliki beda sudut fase 90° atau $\frac{1}{2}\pi$. Tegangan mendahului arus.

3. Rangkaian Arus Bolak-Balik untuk Kapasitor Murni

Kapasitor dengan kapasitas C dipasang pada rangkaian arus bolak-balik. Maka, beda potensial antara ujung-ujung kapasitornya V_{ab} adalah:

$$V_{ab} = V_m \sin \omega t$$

Muatan yang tersimpan pada kapasitor menjadi:

$$q = C.V_{ab}$$

$$q = C.V_m \sin \omega t$$

Apabila persamaan ini didefinisikan terhadap waktu akan diperoleh:

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

karena $\frac{dq}{dt} = i$. Maka,

$$i = \omega.C.V_m \cos \omega t$$

$$i = \omega.C.V_m \sin\left(\frac{1}{2}\pi + \omega t\right)$$

$$i = \omega.C.V_m \sin\left[\pi - \left(\frac{1}{2}\pi - \omega t\right)\right]$$

$$i = \omega.C.V_m \sin\left(\omega t + \frac{1}{2}\pi\right)$$

atau

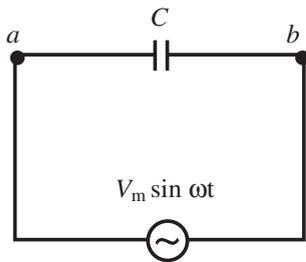
$$i = \frac{V_m}{\omega C} \sin\left(\omega t + \frac{1}{2}\pi\right)$$

$$i = \frac{V_m}{X_C} \sin\left(\omega t + \frac{1}{2}\pi\right)$$

dengan $X_C = \frac{1}{\omega C}$ dan dinamakan dengan reaktansi kapasitif dari suatu kapasitor yang memiliki kapasitansi C .

$$i = i_m \sin\left(\omega t + \frac{1}{2}\pi\right)$$

$$V_m = i_m X_C \text{ atau } i_m = \frac{V_m}{X_C}$$



Gambar 4.11

Sebuah kapasitor C dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik

X_C memiliki satuan sesuai dengan satuan hambatan, sebab satuan ampere = volt/ohm.

X_C disebut reaktansi kapasitif ialah hambatan yang ditimbulkan kapasitor yang dihubungkan dengan sumber arus bolak-balik.

Makin besar harga ω makin mudah suatu kapasitor dilalui arus bolak-balik, sebab reaktansi kapasitif berbanding terbalik dengan kapasitansi.

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

Oleh karena $\omega = 2\pi f$ maka $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$

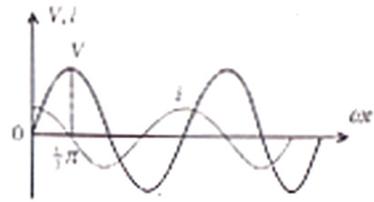
Rangkaian hanya mengandung C saja terjadi keterlambatan tegangan terhadap arus atau arus mendahului tegangan dengan beda fase sebesar $\frac{1}{2}\pi$.

Apabila $i = i_m \sin \omega t$ maka

$$V = V_m \sin \left(\omega t - \frac{1}{2}\pi \right)$$

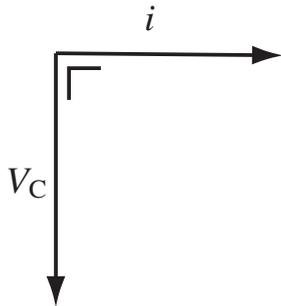
maka

Beda fase antara tegangan terhadap arus adalah 90° atau $\frac{1}{2}\pi$.



Gambar 4.11

Grafik sinuseida untuk rangkaian yang memiliki C saja



Gambar 4.11

Diagram fasor kapasitor murni

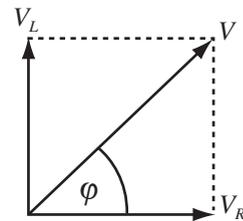
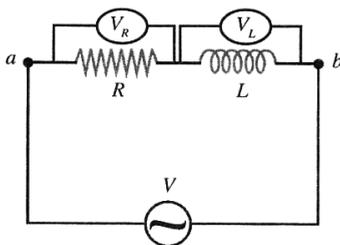
C Resistor dan Induktor Seri

1. Beda Fase Rangkaian R-L Seri

Jika pada rangkaian arus bolak-balik terdapat R dan L yang dipasang secara seri. Maka, antara tegangan induktif berbeda fase 90° (mendahului) terhadap arus, sedangkan tegangan hambatan sefase dengan arusnya maka tegangan induktif X_L mendahului V_R dengan beda sudut fase 90° .

Diagram fasor hubungan antara V_R dan V_L akan diperoleh rangkaian seperti gambar berikut ini.

Apabila dibuatkan grafik tegangan total dan arus dalam sebuah grafik akan diperoleh grafik sebagai berikut.

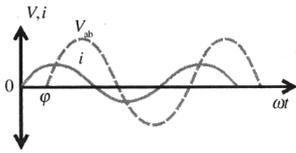


Gambar 4.11

Diagram fasor pada rangkaian RL seri.

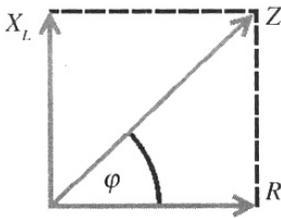
Gambar 4.11

Diagram fasor pada rangkaian RL seri



Gambar 4.11

Beda fase rangkaian RL seri. i dan V_{ab} adalah nilai sesaat (fungsi waktu) arus dan tegangan ab .



Gambar 4.21

Hubungan R dan X_L secara seri.

Beda fase antara tegangan total (V_{ab}) terhadap arus I adalah sebesar φ dengan $0 < \varphi < 90^\circ$. Tegangan mendahului arus.

Dari gambar rangkaian $R-L$ seri diperoleh

$$\tan \varphi = \frac{V_{Lm}}{V_{Rm}} = \frac{i_m X_L}{i_m R} = \frac{X_L}{R}$$

Jika arus sesaat $i = i_m \sin \omega t$

maka $V_{ab} = V_{abm} \sin(\omega t + \varphi)$

$$V_{abd} = \sqrt{V_{Rm}^2 + V_{Lm}^2} = \sqrt{i_m^2 R^2 + i_m^2 X_L^2} = i_m \sqrt{R^2 + X_L^2} = i_m Z$$

dengan

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

Z disebut impedansi $R-L$ seri satuannya ohm. Perhatikan gambar berikut.

R dengan X_L saling tegak lurus karena V_R dengan V_L berbeda fase 90° . φ = sudut pergeseran fase dan $\tan \varphi = \frac{X_L}{R}$.

Contoh Soal 4.2

Pada rangkaian seri $R-L$ yang dihubungkan dengan sumber tegangan arus bolak-balik $V_m = 200$ volt. Hambatan $R = 40$ ohm. Arus maksimum yang mengalir pada rangkaian 2 ampere.

Tentukanlah:

- impedansi rangkaian;
- reaktansi induktif induktornya;
- tegangan antara ujung-ujung induktornya.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$V_m = 200 \text{ volt}$$

$$i_m = 2 \text{ ampere}$$

$$R = 40 \text{ ohm}$$

$$V_m = i_m Z \rightarrow Z = \frac{V_m}{i_m} = \frac{200}{2} = 100 \text{ ohm}$$

- impedansi rangkaian adalah 100 ohm

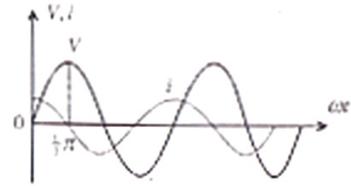
b. reaktansi induktif induktornya

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \rightarrow X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{100^2 - 40^2}$$

$$= \sqrt{10000 - 1600} = \sqrt{8400} = 20\sqrt{21} \text{ ohm}$$

c. tegangan antara ujung-ujung induktor

$$V_{Lm} = i_m \cdot X_L = 2 \cdot 20\sqrt{21} = 40\sqrt{21} \text{ volt}$$



2. Hubungan Fasor Tegangan V_S , V_R , dan V_L

\vec{V}_S adalah fasor tegangan ujung-ujung sumber atau tegangan jepit rangkaian. \vec{V}_R adalah fasor tegangan antara ujung-ujung hambatan R , sedangkan \vec{V}_L adalah fasor tegangan antara ujung-ujung induktor. dan satu sama lain saling tegak lurus karena beda fase 90° atau berbeda fase sperempat siklus.

Perhatikan gambar diagram fasor berikut.

\vec{V}_R dan \vec{V}_L saling tegak lurus

φ pergeseran sudut fase

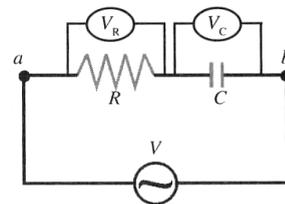
$$V_{sm} = \sqrt{V_{Rm} + V_{Lm}}$$

Dari tegangan-tegangan ini yang dapat diukur dengan alat ukur voltmeter hanya tegangan efektif saja. Tegangan efektif dapat juga disebut tegangan terukur.

D. Resistor dan Kapasitor Seri

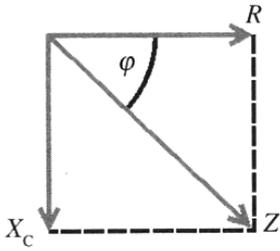
1. Beda Fase Rangkaian R-C Seri

Hambatan R dan kapasitor dengan kapasitansi C yang dirangkakan secara seri pada rangkaian arus bolak-balik akan menimbulkan beda fase antara tegangan hambatan (V_R) terhadap tegangan kapasitif (V_C) sebesar 90° . Ada beda fase tegangan kapasistif terhadap arus sebesar 90° sehingga akan terjadi pergeseran fase sebesar φ antara tegangan total terhadap arus.



Gambar 4.21

Rangkaian RC seri



Gambar 4.21

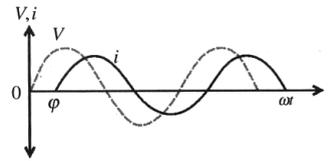
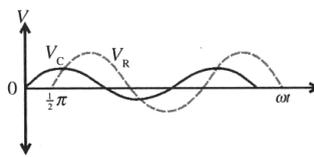
Diagram fasor pada rangkaian RC seri

Apabila pada rangkaian hanya terdapat C saja. V_C dan i_C berbeda fase 90° atau $\frac{1}{2}\pi$. Arus mendahului tegangan pada $t = 0$ tegangan berharga nol, sedangkan arus sudah memiliki nilai maksimum. V_R dan V_C memiliki beda fase 90° .

V_{ab} adalah nilai pada hambatan R ditambah dengan nilai tegangan pada kapasitor. Kemudian, apabila dibuat grafik tegangan V_{ab} dan arus dalam sebuah grafik terhadap waktu akan diperoleh sebagai berikut.

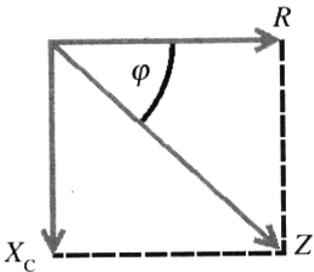
Gambar 4.21

- Beda fase pada rangkaian RC seri. V_C dan V_R adalah nilai sesaat tegangan pada C dan R
- Grafik tegangan dan arus terhadap waktu.



2. Impedansi Rangkaian R-C Seri

Rangkaian R-C seri kedua komponen ini dihubungkan dengan sumber arus bolak-balik. Oleh karena antara V_R terhadap V_C memiliki beda fase 90° maka fasor V_R dan V_C satu sama lain akan saling tegak lurus. Demikian pula fasor $\frac{V_R}{L_m}$ yang panjangnya R dengan fasor $\frac{V_C}{i_m}$ yang panjangnya X_C (reaktansi kapasitif) akan saling tegak lurus seperti pada gambar berikut.



Gambar 4.21

Diagram fasor untuk R dan X_C pada rangkaian RC

Impedansi Z dapat dicari dari diagram fasor berikut ini.

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

Z disebut impedansi dari rangkaian R- X_C secara seri. Satuan impedansi adalah ohm.

3. Hubungan Tegangan V , V_R , dan V_C

Dengan diagram vektor V dapat ditentukan karena V_R dan V_C saling tegak lurus.

- $\frac{V_R}{i_m}$ = fasor tegangan antara ujung-ujung resistor
- $\frac{V_C}{i_m}$ = fasor tegangan antara ujung-ujung kapasitor
- V = fasor jumlah vektor antara dan

Jika $V_{Rm} = i_m R$ maka $V_{Ref} = i_{ef} R$
 $V_{cm} = i_m X_C$ maka $V_{cef} = i_{ef} X_C$
 $V_{sm} = i_m Z$ maka $V_{sef} = i_{ef} Z$

Contoh Soal 4.3

Sebuah kapasitor dengan reaktansi 40 ohm dihubungkan seri dengan sebuah resistor yang memiliki hambatan 60 ohm. Rangkaian ini dihubungkan dengan sumber arus bolak-balik yang memiliki tegangan jepit 200 volt. Tentukanlah:

- impedansi rangkaian;
- tegangan jepit V_R dan V_C .

Penyelesaian:

Diketahui:

$$V_{ef} = 200 \text{ V}$$

$$R = 60 \text{ ohm}$$

$$X_C = 40 \text{ ohm}$$

- Impedansi rangkaian

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{60^2 + 40^2} = \sqrt{3600 + 1600} = \sqrt{5200} \\ = 72,11 \text{ ohm}$$

- Tegangan efektif V_R dan V_C

$$i_{ef} = \frac{V_{Ref}}{R} = \frac{V_{Cef}}{X_C} = \frac{V_{sef}}{Z}$$

$$\frac{V_{Ref}}{R} = \frac{V_{ef}}{Z} \Rightarrow V_{Ref} = \frac{R}{Z} V_{ef} = \left(\frac{60}{72,11} \right) (200) = 166,41 \text{ V}$$

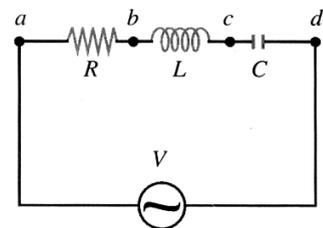
$$\frac{V_{Cef}}{X_C} = \frac{V_{ef}}{Z} \Rightarrow V_{Cef} = \frac{X_C}{Z} V_{ef} = \left(\frac{40}{72,11} \right) (200) = 110,94 \text{ V}$$

1. Tegangan Rangkaian R-L-C Seri

Perhatikan gambar berikut!

Suatu rangkaian terdiri dari hambatan, induktor, dan kapasitor yang disusun secara seri.

Kemudian, rangkaian tersebut dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik sehingga setiap komponen akan menunjukkan karakternya masing-masing.



Arus sesaatnya $i = i_m \sin \omega t$. Maka,

$$V_{ab} = i_m R \sin \omega t$$

$$V_{bd} = i_m \omega L \sin \left(\omega t + \frac{1}{2} \pi \right) = i_m X_L \sin \left(\omega t + \frac{1}{2} \pi \right)$$

$$V_{dc} = i_m \frac{1}{\omega C} \sin \left(\omega t - \frac{1}{2} \pi \right) = i_m X_C \sin \left(\omega t - \frac{1}{2} \pi \right)$$

Coba Anda perhatikan, pada komponen R arus sefase dengan tegangan. Pada komponen L tegangan mendahului

arus dengan beda fase $\frac{1}{2} \pi$ dan pada komponen C arus mendahului tegangan atau tegangan terlambat dengan

beda fase $\frac{1}{2} \pi$.

Karena setiap komponen dilewati oleh arus yang sama dengan nilai maksimum sebesar i_m maka impedansi rangkaian diberi alat persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

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

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

Z disebut impedansi dari rangkaian, impedansi bersatuan ohm.

2. Rangkaian V , V_R , V_L , dan V_C

Pada rangkaian R - L - C seri jika $V_{ae} = V$, $V_{ab} = V_R$, $V_{bd} = V_L$, dan $V_{dc} = V_C$. Maka, dengan memakai diagram fasor akan diperoleh:

$$\vec{V} = \vec{V}_R + \vec{V}_L + \vec{V}_C$$

Oleh karena \vec{V}_R , \vec{V}_L , dan \vec{V}_C saling tegak lurus maka harga V dapat ditentukan dengan menggunakan hitung vektor, yaitu:

$$V_m^2 = V_{Rm}^2 + (V_{Lm} - V_{Cm})^2$$

$$V_m = \sqrt{V_{Rm}^2 + (V_{Lm} - V_{Cm})^2}$$

Hubungan antara tegangan maksimum (V_m) dan arus maksimum (i_m) pada rangkaian adalah:

$$V_m = i_m \cdot Z$$

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

Adapun bentuk sinusoidal tegangannya adalah rangkaian R - L - C seri akan menjadi:

$$V = i_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \sin(\omega t + \phi)$$

atau $V = V_m \sin(\omega t + \phi)$

Perhatikan gambar berikut!

Dari gambar di atas ϕ dapat ditentukan:

$$\tan \phi = \frac{V_L - V_C}{V_R} = \frac{(X_L - X_C)}{R}$$

dengan $(X_L - X_C)$ adalah reaktansi rangkaian. Jika positif disebut induktif dan negatif disebut kapasitif. Adapun ϕ menunjukkan beda fase antara tegangan V dan

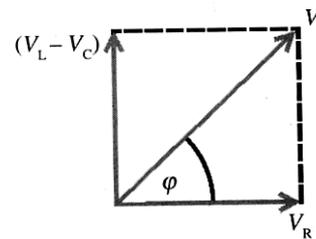
arus i . Jika Anda masukkan harga $X_L = \omega L$ dan $X_C = \frac{1}{\omega C}$ ke dalam persamaan

$$\tan \phi = \frac{V_L - V_C}{V_R} = \frac{(X_L - X_C)}{R}$$

. Maka, kemungkinan-kemungkinan harga ϕ akan menjadi sebagai berikut.

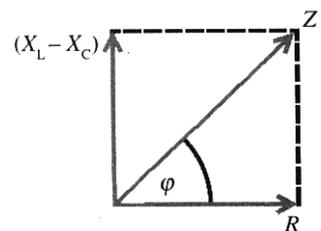
- Jika $\omega L > \frac{1}{\omega C}$: maka $\tan \phi$ berharga positif, berarti tegangan mendahului arus dan rangkaian bersifat induktif.
- Jika $\omega L < \frac{1}{\omega C}$: maka $\tan \phi$, berarti arus mendahului tegangan dan rangkaian bersifat kapasitif.
- Jika : maka $\tan \phi$ menjadi nol, berarti $X_L = X_C$ impedansinya $Z = R$. Jadi, dalam rangkaian yang berfungsi hanya hambatan R saja.

$$\omega L < \frac{1}{\omega C}$$



Gambar 4.21

Diagram fasor pada rangkaian RLC seri.



3. Resonansi Rangkaian R-L-C Seri

Jika $X_L = X_C$ maka impedansi rangkaian Z menjadi sama dengan hambatan R . Rangkaian yang memiliki nilai seperti ini disebut rangkaian yang beresonansi. Nilai Z -nya minimum maka i_m atau i_{ef} -nya maksimum.

Besarnya frekuensi resonansi rangkaian tersebut memenuhi persamaan sebagai berikut.

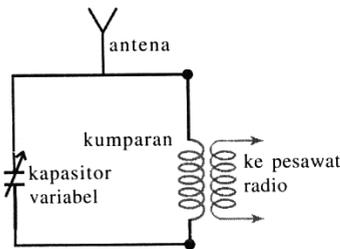
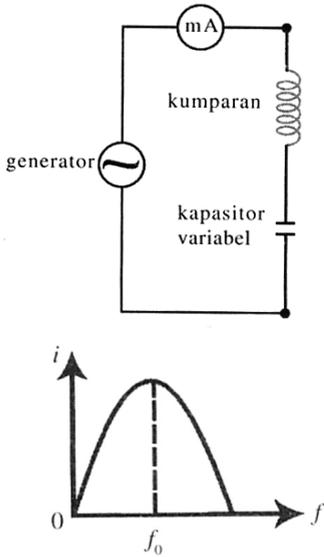
$$X_L = X_C$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \rightarrow \omega^2 = \frac{1}{LC}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

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

f disebut frekuensi resonansi rangkaian



Gambar 4.21

Rangkaian resonansi induktor L dan kapasitor C paralel

Contoh Soal 4.4

Rangkaian R-L-C seri dengan $R = 90$ ohm, $X_L = 100$ ohm, dan $X_C = 40$ ohm. Rangkaian ini dihubungkan dengan tegangan bolak-balik dengan tegangan efektif 220 V. Tentukanlah:

- impedansi rangkaian;
- arus efektif yang mengalir pada rangkaian;
- tegangan efektif antara ujung-ujung induktor.

Penyelesaian:

- Impedansi rangkaian

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(90)^2 + (100 - 40)^2}$$

$$= \sqrt{8100 + 3600} = 108,16 \text{ ohm}$$

- Arus efektif pada seluruh rangkaian

$$i_{ef} = \frac{V_{ef}}{Z} = \frac{220}{108,16} = 2,03 \text{ A}$$

- Tegangan efektif antara ujung-ujung induktor

$$V_{Lef} = i_{ef} \cdot X_L = (2,03)(100) = 203 \text{ V}$$

F. Daya pada Rangkaian Arus Bolak-Balik

Apabila pada rangkaian hanya terdapat R saja maka daya yang dipergunakan oleh R akan memenuhi persamaan sebagai berikut.

$$P = i_{ef}^2 \cdot R$$

Adapun pada rangkaian R-L-C seri maka daya yang dipergunakan adalah:

$$P = i_{ef}^2 \cdot Z \Rightarrow P = i_{ef}^2 \cdot \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

ternyata daya ini tidak sesuai dengan kenyataannya. Persamaan di atas hanya merupakan daya semu saja.

Daya sesungguhnya yang dipergunakan pada seluruh rangkaian R-L-C nilainya tetap seperti pada rangkaian yang hanya mengandung R saja.

$$P = i_{ef}^2 \cdot R$$

Daya semu selalu memiliki nilai yang lebih besar daripada daya sesungguhnya. Perbandingan antara daya sesungguhnya dan daya semi disebut faktor daya.

$$\text{faktor daya} = \frac{\text{daya sesungguhnya}}{\text{daya semu}}$$

$$\text{faktor daya} = \frac{i_{ef}^2 \cdot R}{i_{ef}^2 \cdot Z} = \frac{R}{Z}$$

Apabila dibuat diagram vektornya $\frac{R}{Z} \cos \varphi$

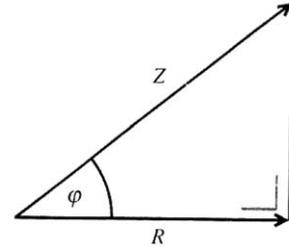
$$\text{faktor daya} = \frac{R}{Z} \cos \varphi$$

Sehingga

Jadai, dalam setiap perhitungan daya yang Anda hitung hanyalah daya sesungguhnya saja. Perumusannya menjadi

$$P = i_{ef}^2 \cdot Z \cos \varphi$$

Oleh karena $i_{ef} = \frac{V_{ef}}{Z}$ maka besarnya daya yang digunakan



Gambar 4.21

Faktor daya $\cos \varphi = R/Z$

oleh rangkaian dapat dituliskan menjadi $P = i_{ef}^2 \cdot V_{ef} \cos \phi$
Ternyata besarnya daya yang sesungguhnya ini merupakan daya atau energi listrik per satuan waktu yang dipergunakan oleh hambatan ohm saja. Hal tersebut disebabkan tidak ada daya rata-rata yang hilang pada elemen kapasitif murni dalam elemen induktif murni.
Pada kapasitor dan induktor murni, setengah periode energi diambil. Kemudian, setengah periode berikutnya diberikan kembali pada rangkaian. Pada kapasitor terjadi pengisian dan pengosongan pada induktor seperti baterai yang diisi lalu dikosongkan dengan menghasilkan arus.

Ringkasan

- Arus dan tegangan bolak-balik adalah arus dan tegangan yang arahnya selalu berubahnya terhadap waktu secara periodik. Besarnya ini disebut tersebut tegangan atau arus AC (*Alternating Current*).
- Besaran yang terukur oleh **Voltmeter** atau **Amperemeter** AC adalah nilai rms (*root mean square*) atau nilai efektif dari tegangan atau arus.
- Hubungan antara arus dan tegangan efektif, serta arus dan tegangan maksimum dari sumber arus bolak-balik adalah

$$i_{ef} = \frac{i_m}{\sqrt{2}} \quad \text{dan} \quad V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$
- Nilai rata-rata arus bolak-balik adalah kuat arus bolak-balik yang harganya setara dengan kuat arus searah yang memindahkan sejumlah muatan listrik yang sama dalam waktu yang sama.
- Hubungan antara arus dan tegangan rata-rata serta arus dan tegangan maksimum adalah

$$i_r = \frac{i_m}{\pi} \quad \text{dan} \quad V_r = \frac{2V_m}{\pi}$$
- Jika sebuah resistor R dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, arus dan tegangan listrik memenuhi persamaan

$$i = i_m \sin \omega t \quad \text{dan} \quad V_r = \frac{2V_m}{\pi}$$
- Induktor dengan induktansi diri L dipasang pada rangkaian tegangan bolak-balik. Arus dan beda potensial antara ujung-ujung induktor adalah

$$i_{ab} = i_m \sin \omega t \quad \text{dan} \quad V_{ab} = V_m \sin \left(\omega t + \frac{1}{2}\pi \right)$$
- Kapasitor dengan kapasitas C dipasang pada rangkaian arus bolak-balik. Arus dan tegangan antara ujung –ujung kapasitor adalah

$$i_{ab} = i_m \sin \omega t \quad \text{dan} \quad V_{ab} = V_m \sin \left(\omega t - \frac{1}{2}\pi \right)$$
- Impedansi rangkaian RLC seri:

$$Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}$$
- Beda fase rangkaian RLC seri:

$$\tan \varphi = \frac{x_L - x_C}{R}$$
- Resonansi Rangkaian RLC

$$x_L = x_C \Rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$
- Faktor daya memenuhi persamaan

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}$$
- Besarnya daya memenuhi persamaan

$$P = i_{ef} V_{ef} \cos \varphi$$

Uji Kompetensi Bab 4

A. Pilihlah satu jawaban yang benar

- Jika kapasitor C , induksi L , dan tahanan R dipasang secara seri, maka frekuensi resonansi rangkaian dapat diturunkan dengan
 - mengecilkan R
 - membesarkan L
 - mengecilkan C
 - membesarkan tegangan pada ujung-ujung rangkaian
 - mengecilkan arus dalam rangkaian
- Sebuah hambatan murni $15\ \text{ohm}$ dihubungkan dengan induktor yang memiliki reaktansi induktif $20\ \text{ohm}$. Rangkaian ini dipasang pada tegangan efektif bolak-balik $100\ \text{volt}$. Faktor daya pada rangkaian itu adalah
 - $0,2$
 - $0,3$
 - $0,4$
 - $0,5$
 - $0,6$
- Sebuah hambatan $10\ \text{ohm}$ dihubungkan seri dengan sebuah kapasitor $25\ \mu\text{F}$. Maka, impedansi pada frekuensi $1000\ \text{Hz}$ adalah
 - $12\ \text{ohm}$
 - $15\ \text{ohm}$
 - $3\ \text{ohm}$
 - $9\ \text{ohm}$
 - $7\ \text{ohm}$
- Sebuah sumber tegangan arus bola-balik dihubungkan dengan sebuah kapasitor. Arus efektif yang mula-mula melewati kapasitor adalah i_{ef} . Jika kapasitas kapasitor didakalikan maka arus efektif yang melewati kapasitor menjadi
 - $0,5i_{\text{ef}}$
 - i_{ef}
 - $2i_{\text{ef}}$
 - $3i_{\text{ef}}$
 - $4i_{\text{ef}}$
- Pada frekuensi $1000\ \text{Hz}$, reaktansi dari sebuah indikator adalah $2000\ \text{ohm}$, dan reaktansi dari sebuah kapasitor adalah $5000\ \text{ohm}$. Jika induktor dan kapasitor tersebut kita pasang pada suatu rangkaian, maka resonansi akan terjadi pada frekuensi
 - $2500\ \text{Hz}$
 - $1823\ \text{ohm}$
 - $1500\ \text{ohm}$
 - $2236\ \text{ohm}$
 - $2500\ \text{ohm}$
- Jarum suatu amperemeter yang digunakan mengukur arus pada rangkaian arus bolak-balik menunjukkan angka $10\ \text{mA}$. Ini berarti bahwa arus yang mengalir pada rangkaian
 - tetap $10\ \text{mA}$
 - berubah antara 0 dan $10\ \text{mA}$
 - berubah antara 0 dan $10\ \text{mA}$
 - berubah antara $-10\ \text{mA}$ dan $10\ \text{mA}$
 - berubah antara $-10\ \text{mA}$ dan $10\ \text{mA}$
- Beda potensial jala-jala listrik pada sebuah rumah $220\ \text{volt}$ dan memiliki frekuensi $100\ \text{Hz}$, dihubungkan seri dengan $R = 10\ \text{ohm}$ dan $L = 0,03\ \text{henry}$. Arus yang mengalir pada rangkaian adalah
 - $15\ \text{ampere}$
 - $3\ \text{ampere}$
 - $12,5\ \text{ampere}$
 - $10,3\ \text{ampere}$
 - $4\ \text{ampere}$
- Sumber arus PLN adalah arus bolak-balik, tetapi lampu pijar di rumah tidak kelihatan berkedip-kedip sebab
 - tekanan lampu pijar relatif
 - tekanan lampu pijar relatif kecil
 - frekuensi arus bolak-balik relatif besar
 - frekuensi arus bolak-balik relatif kecil
 - semua jawaban di atas salah
- Pada frekuensi $100\ \text{Hz}$, reaktansi daripada sebuah kapasitor $4000\ \text{ohm}$ dan reaktansi daripada sebuah inductor adalah $1000\ \text{ohm}$. Jika kapasitor dan inductor tersebut dipasang pada sebuah rangkaian, maka akan terjadi resonansi pada frekuensi
 - $60\ \text{Hz}$
 - $300\ \text{Hz}$
 - $400\ \text{Hz}$
 - $500\ \text{Hz}$
 - $200\ \text{Hz}$
- Pada frekuensi berapakah sebuah rangkaian R-L-C seri yang dihubungkan bertegangan bolka-balik akan beresonansi. Apabila $R = 80\ \text{ohm}$, $L = 1\ \text{henry}$, dan $C = 1\ \text{F}$?

- a. $\frac{50}{\pi}$ Hz
- b. $\frac{100}{\pi}$ Hz
- c. $\frac{250}{\pi}$ Hz
- d. $\frac{400}{\pi}$ Hz
- e. $\frac{500}{\pi}$ Hz
11. Kita ukur tegangan jaringan listrik di rumah dengan memakai voltmeter, maka yang terukur adalah tegangan
- maksimumnya
 - efektifnya
 - sesaatnya
 - rata-ratanya
 - minimumnya
12. Dari rangkaian seperti gambar berikut ini jika harga R, L, dan C cukup sesuai maka akan berlaku
- -
 -
 -
 -
13. Jarum suatu voltmeter yang dipergunakan untuk mengukur suatu tegangan bolak-balik menunjuk harga 110 volt. Ini berarti bahwa tegangan itu
- tetap
 - berubah antara 0 dan 110 volt
 - berubah antara 0 dan $110\sqrt{2}$ volt
 - berubah antara -110 volt dan +110 volt
 - berubah antara $-1100\sqrt{2}$ volt dan $+110\sqrt{2}$ volt
14. Tinjau sebuah rangkaian R-L-C seri seperti gambar berikut. $R = 80$ ohm, $X_L = 120$ ohm, dan $X_C = 60$ ohm. Dihubungkan dengan sumber arus bolak-balik yang memiliki tegangan efektif 150 V. Daya yang dipakai rangkaian adalah
- 90 W
 - 100 W
 - 120 W
 - 180 W
 - 240 W
15. Jika pada sebuah voltmeter arus bolak-balik terbaca 100 volt, maka
- tegangan maksimumnya 100 volt
 - tegangan maksimumnya 110 volt
 - tegangan efektifnya $100\sqrt{2}$ volt
 - tegangan rata-rata 110 volt
 - tegangan maksimum $100\sqrt{2}$
- 100 ohm
 - 300 ohm
 - 400 ohm
 - 500 ohm
 - 1000 ohm
16. Sebuah sumber tegangan volt dihubungkan dengan sebuah resistor $R = 80$ ohm dan induktor $L = 0,5$ H. Besarnya arus listrik maksimum yang melalui rangkaian tersebut adalah
- 6 mA
 - 12 mA
 - 60 mA
 - 80 mA
 - 120 mA
17. Bola lampu dari 10 watt dan 110 volt dapat dipakai pada
- arus bolak-balik saja
 - arus searah saja
 - arus bolak-balik maupun searah
 - arus bolak-balik dengan tegangan 220 volt
 - tidak ada jawaban yang benar
18. Tegangan listrik di rumah 220 V. Sebuah alat listrik dengan hambatan 20 ohm dipasang pada tegangan listrik tersebut. Tentukan nilai efektif dan maksimum arus!
- 10 A dan 14,1 A
 - 14,1 A dan 10 A
 - 11 A dan 15,6 A
 - 15,6 A dan 11 A
 - 11 A dan 7,8 A

19. Tiga sumber tegangan masing-masing GGL-nya 1,5 volt dan tahanan dalamnya 1 ohm dihubungkan seri diberi beban tahanan 3 ohm, maka daya yang diberikan pad beban sebesar
- 27/16 watt
 - 27/32 watt
 - 27/4 watt
 - 27/2 watt
 - semuanya salah
20. Sebuah resistor dengan 25 ohm dihubungkan dengan kumparan yang memiliki induktansi diri 30 MH dan kapasitor yang memiliki kapasitansi 12 F. Ketiga komponen dirangkai seri seperti pada gambar berikut ini.

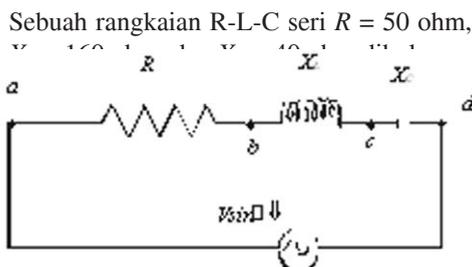
Jika tegangan listrik efektif rangkaian 90 V dan frekuensinya 500 Hz, arus efektif yang mengalir pada setiap komponen adalah

- 0,73 A
- 3,6 A
- 0,77 A
- 1,25 A
- 1,77 A

B. Soal Uraian

Jawablah pertanyaan-pertanyaan dibawah ini dengan benar.

- Sebuah inductor 0,2 H dan sebuah resistor murni 30ohm disusun seri dan dihubungkan dengan tegangan bolak-balik (tegangan efektif 10 V) yang memiliki frekuensi sudut 200 rad/s. Tentukanlah:
 - Impedansi rangkaian;
 - Kuat arus efektif;
 - Sudut fase antara arus dan tegangan.
- Pada frekuensi berapakah sebuah rangkaian R-L-C seri akan beresonansi apabila $R = 80$ ohm, $L = 1$ H, dan $C = 1$ F yang dihubungkan dengan tegangan bolak-balik?
- Perhatikan gambar berikut ini.
Sebuah rangkaian R-L-C seri $R = 50$ ohm, $L = 100$ mH, dan $C = 100$ μ F. Tentukanlah:
 - impedansi rangkaian;
 - kuat arus pada rangkaian;
 - V_{ab} , V_{bd} , dan V_{de} ;
 - Daya yang digunakan pada rangkaian.
- Sebuah rangkaian seri terdiri atas resistor 100 ohm yang tidak memiliki induktansi, kumparan berinduktansi 0,10 H dengan hambatan yang dapat diabaikan dan kapasitor 20 F. Rangkaian dihubungkan pada sumber daya 110 V;60 Hz. Tentukanlah:
 - Arus yang mengalir;
 - Daya yang hilang;
 - Sudut fase antara arus dan tegangan sumber;
 - Penunjukkan voltmeter pada ketiga unsur itu.
- Hitunglah ferkuensi resonansi rangkaian yang memiliki induktansi diri induktor 100 H dan kapasitansi kapasitor 400 F.
- Sebuah rangkaian RL seri dihubungkan dengan sumber tegangan arus bolak balik $V_m = 200$ V. Hambatan $R = 40$ ohm. Jika arus maksimum yang mengalir pada rangkaian 4 ampere, tentukanlah:
 - impedansi rasngkaian;
 - reaktansi induktif induktornya;
 - tegangan antara ujung-ujung induktor.
- Sebuah kumparan dengan induktansi diri induktor 200 mH dan sebuah kapasitor 2 F disusun seri dengan frekuensi sumber tegangan 2000 rad/s. Apabila

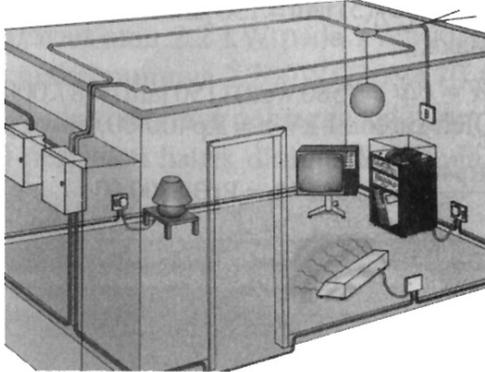


sudut fase antara tegangan sumber dan kuat arus 60° , tentukanlah hambatan kumparan tersebut.

8. Sebuah kapasitor murni 350 F dihubungkan seri dengan sebuah resistor 16 ohm. Kemudian, dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik $V_m = 14$ V dan frekuensi sudut 300 rad/s. Tentukanlah:
 - a. impedansi rangkaian;
 - b. sudut fase antara arus dan tegangan;
 - c. persamaan kuat arusnya.
9. Rangkaian seri terdiri atas sebuah kumparan dan kapasitor yang dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik $V_{ef} = 110$ V dan frekuensi sudutnya 500 rad/s. Apabila induktansi kumparan 1 H, hambatan kumparan 400 ohm, dan kapasitor 2,5 F. Tentukanlah:
 - a. arus efektif rangkaian;
 - b. daya yang dipakai oleh rangkaian.
10. Sebuah resistor 11 ohm berhubungan dengan kumparan yang reaktansi induktifnya 120 ohm dan juga dengan kapasitor yang reaktansinya 120 ohm. Semuanya dihubungkan secara seri dengan sumber 110 V; 60 Hz. Tentukanlah beda potensial pada masing-masing rangkaian.

Rangkaian Listrik di Rumah?

Konsep fisika juga dimanfaatkan dalam rangkaian listrik di rumah. Seperti yang kamu ketahui, kabel listrik memiliki hambatan, walaupun nilainya kecil. Meskipun demikian, jika arus



mengalir terlalu besar, kabel akan memanas dan akan menghasilkan energi panas yang sama dengan . Kabel yang panas ini jika berada di rumah akan menyebabkan kebakaran. Oleh sebab itu, untuk menghindari kelebihan arus ini dipasanglah sekering pada rangkaian listrik di rumah-rumah. Sebuah sekering dengan nilai 20 A dipasang pada

sebuah rangkaian. Jika arus melalui sekering melebihi 20 A, sekering akan terputus dan bahaya kebakaran akan terhindar. Rangkaian listrik di rumah juga menggunakan rangkaian paralel. Rangkaian dirancang agar setiap alat yang dipasang akan menerima tegangan agar setiap alat yang dipasang akan menerima tegangan yang sama (di Indonesia tegangan standarnya 110 V dan 220 V). Kemudian, jika suatu alat rusak, misalnya lampu pijar putus, alat yang lain tidak ikut padam dan masih dapat berfungsi.

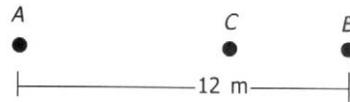
Uji Kompetensi Semester 1

A. Pilihlah satu jawaban yang benar

1. Gelombang air laut menyebabkan permukaan air laut naik turun dengan periode 2 detik. Jika jarak antara dua puncak gelombang 5 meter, maka gelombang akan mencapai jarak 10 meter dalam waktu
 - A. 1 detik
 - B. 2 detik
 - C. 3 detik
 - D. 4 detik
 - E. 5 detik
2. Pada permukaan suatu danau terdapat dua buah gabus yang terpisah satu dari lainnya sejauh 60 cm. Keduanya turun naik bersama permukaan air dengan frekuensi 2 getaran perdetik. Bila salah satu gabus berada di puncak bukit gelombang, yang lainnya berada di lembah gelombang, sedangkan di antara kedua gabus itu terdapat satu bukit gelombang cepat rambat gelombang pada permukaan danau adalah
 - A. 20 cm/s
 - B. 30 cm/s
 - C. 80 cm/s
 - D. 120 cm/s
 - E. 240 cm/s
3. Jarak antara dua muka gelombang yang berdekatan pada permukaan air disebut sebagai satu
 - a. periode gelombang
 - b. frekuensi gelombang
 - c. panjang gelombang
 - d. amplitudo gelombang
 - e. fase gelombang
4. Sebuah tabung gelas kedua ujungnya terbuka. Tabung gelas tersebut dimasukkan ke dalam bejana berisi air. Diatas tabung digetarkan garputala dengan frekuensi tertentu. Mula-mula tabung penuh berisi air lalu ditarik keatas. Jika bunyi paling keras pertama terdengar pada saat panjang tabung yang di atas air 18 cm, maka panjang gelombang bunyi tersebut di udara adalah

- A. 162 cm
- B. 144 cm
- C. 72 cm
- D. 54 cm
- E. 50 cm

5. Perhatikan gambar berikut.



A dan B merupakan sumber bunyi yang memancar ke segala arah. Energi bunyi yang dipancarkan A dan B masing-masing 1,2 W dan 0,3 W. Agar intensitas bunyi yang diterima C dari A dan B sama besarnya maka C terletak

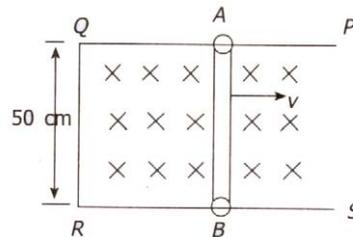
- | | Dari A | Dari B |
|----|--------|--------|
| A. | 10 m | 2 m |
| B. | 9 m | 3 m |
| C. | 8 m | 4 m |
| D. | 7 m | 5 m |
| E. | 1 m | 11 m. |
6. Sebuah Suling yang memiliki kolom udara terbuka pada kedua ujungnya memiliki nada atas kedua ujungnya memiliki nada atas kedua dengan frekuensi 1700 Hz. Jika kecepatan suara diudara adalah 340 m/s maka panjang suling mendekati
 - A. 10 cm
 - B. 15 cm
 - C. 20 cm
 - D. 25 cm
 - E. 30 cm
 7. Sebuah mobil ambulans bergerak dengan kelajuan 30 m/s sambil membunyikan sirine yang menghasilkan frekuensi 900 Hz. Perbedaan frekuensi yang terdengar oleh seseorang yang diam di pinggir jalan ketika mobil ambulans mendekati dan menjauhinya jika cepat rambat bunyi di udara saat itu 340 m/s adalah sekitar

- A. 30 Hz
 B. 60 Hz
 C. 95 Hz
 D. 135 Hz
 E. 180 Hz
8. Suatu berkas cahaya Monokromatis setelah melalui sepasang celah sempit yang jaraknya 0,3 mm membentuk pola interferensi pada layar yang jaraknya 0,9 m dari celah tadi. Jika jarak antara garis gelap kedua terhadap pusat pola 3 mm, maka panjang gelombang cahaya adalah
 A. $1,3 \times 10^{-7}$ m
 B. $2,2 \times 10^{-7}$ m
 C. $3,3 \times 10^{-7}$ m
 D. $6,7 \times 10^{-7}$ m
 E. $10,6 \times 10^{-7}$ m
9. Untuk menentukan panjang gelombang sinar monokromatis digunakan percobaan Young yang data-datanya sebagai berikut: jarak antara kedua celahnya = 0,3 mm, jarak celah ke layar = 50 cm dan jarak antara garis gelap ke-2 dengan garis gelap ke-3 pada layar = 1 mm. Panjang gelombang sinar monokromatis tersebut adalah
 A. 400 nm
 B. 480 nm
 C. 500 nm
 D. 580 nm
 E. 600 nm
10. Lintasan sebuah electron yang bergerak dalam suatu medan listrik dengan kecepatan sejajar arah medan adalah
 A. lingkaran
 B. parabola
 C. elips
 D. heliks
 E. garis lurus.
11. Warna biru langit terjadi karena cahaya matahari mengalami
 a. interferensi
 b. pembiasan
 c. hamburan
 d. pemantulan
 e. difraksi
12. Segumpalan awan mempunyai potensial 8×10^6 volt terhadap bumi. Ketika terjadi kilat antara awan dan bumi suatu muatan listrik sebesar 40 C dilepaskan. Banyaknya energi yang hilang pada peristiwa itu adalah
 A. 5×10^6 J
 B. 2×10^6 J
 C. 5×10^6 J
 D. $1,6 \times 10^6$ J
 E. $3,2 \times 10^6$ J
13. Kapasitansi suatu keeping sejajar yang bermuatan adalah
 A. berbanding lurus dengan besar muatannya
 B. berbanding terbalik dengan beda potensial antara kedua kepingnya.
 C. makin besar jika jarak antara dua keeping diperbesar
 D. makin besar apabila luas kedua keping diperbesar
 E. tidak bergantung pada medium antara kedua keping
14. Sebuah kapasitor mempunyai kapasitas sebesar $5 \mu\text{F}$ bila ada udara di antara keping-kepingnya, dan $30 \mu\text{F}$ jika antara keping-kepingnya ditempatkan lembaran porselen. Konstanta dielektrik porselen sama dengan
 A. 0,17
 B. 6
 C. 25
 D. 35
 E. 150
15. Sebuah kapasitor diberi muatan 10 nC dan mempunyai beda potensial 100 V antara pelat-pelatnya. Kapasitansinya dan tenaga yang tersimpan di dalamnya adalah
 A. 100 pF dan 5×10^{-5} J
 B. 100 pF dan 5×10^{-5} J
 C. 1 nF dan 5×10^{-5} J
 D. 10 nF dan 6×10^{-5} J
 E. 100 n F dan 2×10^{-5} J
16. Dua buah kapasitor identik yang mula-mula belum bermuatan akan dihubungkan dengan baterai 10 V. Jika hanya salah satunya saja yang dihubungkan dengan baterai 10 V tersebut, energi yang tersimpan dalam kapasitor adalah E . energi yang akan tersimpan bila kedua kapasitor tadi dihubungkan seri dengan baterai adalah

- A. $E/4$
 B. $E/2$
 C. E
 D. $2E$
 E. $4E$
14. Besar gaya yang dialami seutas kawat lurus berarus listrik tidak bergantung pada
 A. posisi kawat dalam medan magnetik
 B. panjang kawat
 C. hambatan kawat
 D. kuat arusnya
 E. kuat medan magnetiknya
18. Jika dua kawat lurus sejajar dilalui arus listrik masing-masing I_1 dan I_2 ($I_2 = 2I_1$), maka gaya interaksi tiap satuan panjang pada kawat pertama adalah
 A. $1/2$ kali gaya interaksi pada kawat kedua
 B. sama dengan gaya interaksi pada kawat kedua
 C. 2 kali gaya interaksi pada kawat kedua
 D. $1/4$ Kali gaya interaksi pada kawat kedua
 E. 4 kali gaya intraksi pada kawat kedua
19. Suatu partikel bermuatan $0,04$ C bergerak sejajar dengan kawat berarus listrik 10 A. Jika jarak partikel kawat 5 cm, kelajuan partikel 5 m/s dan $\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7}$ Tm/A. Maka, gaya yang dialami partikel-partikel
 A. 0μ N
 B. 2μ N
 C. 4μ N
 D. 6μ N
 E. 8μ N
20. Sebuah penghantar lurus panjang dialiri arus listrik sebesar $1,5$ A. Sebuah electron bergerak dengan kecepatan 5×10^4 ms⁻¹ searah arus dalam penghantar, pada jarak $0,1$ m dari penghantar itu, jika muatan elektron – $1,6 \times 10^{-19}$ C. Maka, besar gaya pada electron oleh arus dalam penghantar itu adalah

- A. $1,5 \times 10^{-20}$ N
 B. $2,4 \times 10^{-20}$ N
 C. $3,2 \times 10^{-19}$ N
 D. $4,2 \times 10^{-19}$ N
 E. $5,0 \times 10^{-19}$ N

21. Sebuah zarah bermuatan listrik positif bergerak dengan kecepatan sebesar 2×10^5 m/s searah dengan sumbu x positif di dalam ruang yang mengandung medan listrik dan magnetik tetapi tidak berpengaruh terhadap gerakan ini. Jika kuat medan listrik 8×10^8 N/C searah dengan sumbu Z positif. Maka, besar dan arah induksi magnetik adalah
 A. 10 T searah dengan sumbu Z positif
 B. 4 T searah dengan sumbu Z negative
 C. $0,4$ T searah dengan sumbu Y negative
 D. $0,4$ T searah dengan sumbu Y positif
 E. $2,5$ T searah dengan sumbu X negative
22. Kumparan melingkar dengan N lilitan memiliki radius efektif a dan mengalirkan arus I . Kerja yang diperlukan (dalam Joule) untuk meletakkan kumparan tersebut dalam medan magnetik B dari 0 keposisi $= 180$, jika $N = 100$, $a = 5,0$ cm, $I = 0,10$ ampere dan $B = 1,5$ Wb/m adalah....
 A. $0,14$
 B. $0,24$
 C. $1,4$
 D. $2,4$
 E. 24
23. Perhatikan gambar berikut ini.



Rangkaian kawat $PQRS$ terletak dalam medan magnetik yang kuat medannya $0,5$ Wb/m, Dan arahnya masuk bidang kertas (lihat gambar). Jika kawat AB digeser ke kanan dengan kecepatan 4 m/s, gaya gerak listrik induksi yang terjadi adalah

- A. 1 volt dengan arah dari A ke B
 B. 1 volt dengan arah dari B ke A
 C. 4 volt dengan arah dari A ke B
 D. 4 volt dengan arah dari B ke A
 E. 10 volt dengan arah dari A ke B
24. Tongkat konduktor yang panjangnya 1 m berputar dengan kecepatan sudut tetap sebesar 10 rad/s di daam daerah bermedan magnetik seragam $B = 0,1$ T. Sumbu putaran tersebut melau salah satu ujung tongkat dan sejajar arahnya dengan arah garis-garis medan magnetik diatas. GGL yang terinduksi anantara kedua ujung tongkat dalam volt besarnya..
 A.0,5
 B.1,0
 C.1,6
 D.3,1
 E.6,0
25. Suatu kumparan dengan 600 lilitan dan induktansi diri 40 mH mengalami perubahan arus listrik dari 10 ampere menjadi 4 ampere dalam waktu 0,1 detik. Beda potensial antara ujung-ujung kumparan yang diakibatkannya adalah ... volt
 A. 1,8
 B. 2,4
 C. 4,8
 D. 10,8
 E. 14,4
26. Kuat arus listrik dalam suatu rangkaian tiba-tiba turun dari 10 A menjadi 2 A dalam waktu 0,1 detik. Selama peristiwa ini terjadi timbul GGL induksi sebesar 32 V dalam rangkaian. Induktansi rangkaian adalah ... henry.
 A. 0,32
 B. 0,40
 C. 2,5
 D. 32
 E. 40
27. Sebuah toroida ideal, hampa, mempunyai 1000 lilitan dan jari-jari rata-ratanya 0,5 m.kumparan yangterdiri atas 5 lilitan dililitkan pada toroida tersebut. Penampang lintang toroida $2 \cdot 10^{-3}$ m dan arus listrik pada kawat toroida berubah dari 7 A menjadi 9 A dalam satu detik maka di dalam kumparan timbul GGL imbas yang besarnya ...V.
 A. 4
 B. 8
 C. 12
 D. 28
 E. 36
28. Suatu kumparan terdiri dari 200 lilitan berbentuk persegi panjang dengan panjang 10 cm dan lebar 5 cm. Kumparan ini bersumbu putaran tegak lurus medan magnetik sebesar 0,5 Wb/m dan diputar dengan kecepatan sudut 60 rad/s. pada ujung kumparan timbul ggl bolak-balik maksimum sebesar
 A. 30 V
 B. 60 V
 C. 110 V
 D. 220 V
 E. 500 V
29. Menaikkan ggl maksimum suatu generator ac agar menjadi 4 kali semula , dapat dilakukan dengan cara
 A. Jumlah lilitan dilipatduakan dan periode putar menjadi $\frac{1}{2}$ kali mula-mula
 B. Kecepatan sudut dan luas penampang kumparan dijadikan $\frac{1}{2}$ kalinya
 C. Induksi magnetik dan jumlah lilitan dijadikan 4 kali semula
 D. luas penampang dan periode putar dijadikan 2 kali semula
 E. penampang dan periode dijadikan $\frac{1}{2}$ kali semula
30. Banyaknya garis gaya tegak lurus pada bidang per satuan luas menggambarkan besarnya
 a. muatan listrik
 b. potensial listrik
 c. energi potensial listrik
 d. kuat medan listrik
 e. rapat muatan listrik
31. Dua titik A dan B berjarak 0,5 m satu sama lain (A di kiri B). PAda titik A dan B diletakkan muatan-muatan $q_A = -4$ nC dan $q_B = +9$ nC. Letak titik C yang kuat medannya sama dengan nol adalah
 a. 1 m di kanan B
 b. 1 m di kanan A
 c. 1 m di kiri A
 d. 0,25 m di kiri A
 e. pertengahan AB

32. Sebuah kapasitor pelat sejajar yang ruang di antaranya berisi udara dan kapasitansinya C_0 dihubungkan dengan sumber tegangan V . Jika ruang antara kedua pelat kapasitor diisi dengan mika (sumber tegangan tidak dilepas), besaran yang tidak berubah adalah
- kapasitansinya
 - muatannya
 - kuat medannya
 - energinya
 - tidak ada
33. Besar kuat medan magnetik di suatu titik yang letaknya sejauh r dari suatu penghantar lurus yang dialiri arus I adalah sebanding dengan
- I
 - rI
 - r/I
 - I/r
 - $1/rI$
34. Besar kuat medan magnetik di suatu titik yang letaknya sejauh r dari suatu penghantar lurus yang dialiri arus I adalah sebanding dengan
- I
 - rI
 - r/I
 - I/r
 - $1/rI$
35. Sebuah toroida memiliki jari-jari lingkaran efektif 10 cm. Banyaknya lilitan pada toroida tersebut 400 lilitan. Apabila dialiri arus listrik sebesar 5 A, induksi magnetic pada sumbu toroida adalah
- 0,5 mT
 - 1,0 mT
 - 2,5 mT
 - 4,0 mT
36. Tempat kedudukan titik-titik yang memiliki besar induksi magnetic yang sama dari sebiah kawat lurus panjang berarus listrik adalah berupa
- garis lurus
 - lingkaran
 - dua garis sejajar
 - 2,0 mT
 - kulit silinder
 - kulit bola
37. Sebuah kumparan dengan induktansi 0,5 H dialiri arus listrik yang merupakan fungsi waktu, menurut persamaan $i = (10 + 4t)$ ampere, dengan t dalam sekon. Besarnya GGL induksi pada kumparan adalah
- 2 V
 - 4 V
 - 5 V
38. Sebuah kawat beraus listrik 2 A berada dalam medan magnet homogen 10^{-4} Wb/m². Jika panjang kawat 5 m dan arah arus berlawanan arah dengan arah medan magnetiknya, gaya Lorentz yang mempengaruhi kawat tersebut sebesar
- nol
 - 10^{-2} N
 - 10^{-3} N
 - 10^{-4} N
 - 10^{-5} N
39. Berdasarkan Hukum Faraday, satuan weber indetik dengan
- volt per meter
 - watt per meter
 - ampere per sekon
 - volt sekon
 - ampere sekon
40. Tentukan besarnya GGL induksi pada kumparan sekunder, jika induktansi timbale balik kumparan tersebut 0,01 henry dan pada kumparan primernya terjadi perubahan arus listrik sebesar 5 A dalam selang waktu 0,1 sekon.
- 0,5 V
 - 1,5 V
 - 2,5 V
 - 5,0 V
 - 50 V

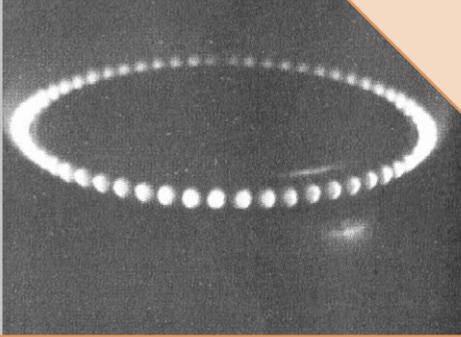
B. Soal Uraian

Jawablah pertanyaan berikut dengan singkat dan jelas.

- Rangkaian seri terdiri atas sebuah kumparan dan kapasitor yang dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik $V_{ef} = 110$ V dan frekuensi sudutnya 500 rad^{-s} . Jika induktansi kumparan 1,0 H, hambatan kumparan 400 ohm dan kapasitor $2,5 \mu\text{F}$, tentukanlah:
 - arus efektif rangkaian;
 - daya yang dipakai oleh rangkaian.
- Pada frekuensi berapakah sebuah rangkaian RLC seri yang dihubungkan dengan arus bolak-balik akan beresonansi, jika $R = 80$ ohm, $L = 1$ henry, dan $C = 1 \mu\text{F}$?



3. Sebuah toroida dengan jari-jari 5 cm terdiri atas 600 lilitan. Berapakah arus yang mengalir pada toroida agar induksi magnetik yang terjadi di dalam toroida adalah $2,4 \times 10^{-3} \text{ Wbm}^{-2}$.
4. Sebuah kawat dibentuk menjadi $\frac{3}{4}$ lingkaran dengan jari-jari 8 cm. Hitunglah induksi magnetik di titik P yang berada di pusat lingkaran, apabila arus yang mengalir pada kawat 16 A.
5. Dua buah proton ($m = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ dan $q = 1,67 \times 10^{-19} \text{ C}$) yang terpisah pada jarak $1,0 \times 10^{-12} \text{ m}$ dilepaskan dari keadaan diam. Hitunglah kecepatan proton ketika keduanya terpisah pada jarak $4,0 \times 10^{-12} \text{ m}$.
6. Potensial pada sebuah titik yang berjarak 3 cm dari sebuah muatan titik yang berada di udara adalah $6 \times 10^5 \text{ V}$. Tentukanlah kuat medan listrik pada titik tersebut. ($k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$)
7. Taraf intensitas bunyi sebuah kendaraan rata-rata 50 dB diukur dari jarak 1 meter. Tentukanlah taraf intensitas bunyi dari 10 kendaraan diukur dari jarak 10 meter.
8. Seberkas cahaya monokromatis dengan panjang gelombang 6.600 \AA datang tegak lurus pada kisi. Jika garis terang orde ke-2 membuat sudut 30° dengan garis normal pada kisi, tentukanlah jarak antarcelah pada kisi.
9. Sebuah pipa organa tertutup memiliki panjang 1,2 m dan cepat rambat bunyi di udara 360 m/s. Tentukanlah tiga frekuensi harmonik terendah yang dihasilkan pipa organa tersebut.
10. Gelombang merambat dari titik A ke titik B dengan jarak 0,3 m, amplitude 10-2, dan periode 0,2 sekon. Jika cepat rambat gelombang 2,5 m/s, hitunglah beda fase antara titik A dan B.



Bab 5

Sumber: CD Image, 2004

Radiasi Benda Hitam

Benda yang panas akan memancarkan radiasi elektromagnetik. Penyelidikan atas spektrum radiasi yang dipancarkan benda panas merupakan titik awal menuju pada pemahaman konsep gelombang partikel. Pernahkah Anda memperhatikan lampu pijar saat menyala? Saat menyala, lampu pijar memancarkan cahaya yang bersumber dari filamen. Jika arus listrik dialirkan, filamen ini akan menahan arus listrik. Hal ini menyebabkan kenaikan suhu filamen yang sangat cepat sehingga filamen menyala dan memancarkan cahaya. Pemancaran cahaya akibat kenaikan sinar demikian dinamakan radiasi termal.

Dalam bab ini, Anda akan mempelajari radiasi, yaitu radiasi benda hitam. Apa yang dimaksud dengan radiasi benda hitam? Anda dapat mengetahui jawabannya pada pembahasan berikut.

Standar Kompetensi

Menganalisis berbagai besaran fisis pada gejala kuantum dan batas-batas berlakunya relativitas Einstein dalam paradigma fisika modern.

Kompetensi Dasar

Menganalisis secara kualitatif gejala kuantum yang mencakup hakikat dan sifat-sifat radiasi benda hitam serta penerapannya.

- A. Pengertian Radiasi Benda Hitam
- B. Pergeseran Wien
- C. Teori Rayleigh-Jeans
- D. Teori Kuantum Max Planck

Kata Kunci

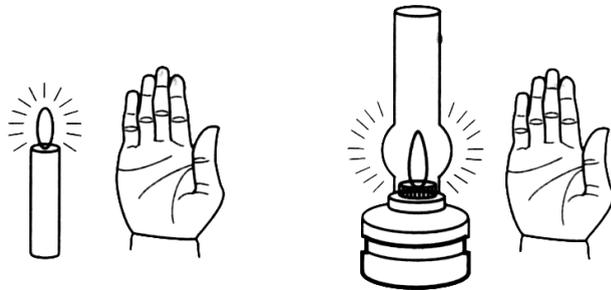
Radiasi
Stefon-Boltmann
Wien
Max Planck
Energi
Fotolistrik

A. Pengertian Radiasi Benda Hitam

Bagaimanakah hubungan antara banyaknya energi yang dipancarkan dengan suhu benda? Secara sederhana, kita dapat melakukan eksperimen ataupun melalui pengamatan terhadap sebuah benda yang sedang berpijar. Mendekatkanlah ke sebuah lilin yang sedang menyala. Dekatkan tangan Anda. Anda akan merasakan adanya kalor yang dipancarkan lilin ke tangan Anda. Sekarang, coba Anda gantilah lilin tersebut dengan sumber api lain yang lebih besar, misalnya lampu minyak berukuran besar. Anda akan merasakan bahwa kalor yang dipancarkan ke tangan Anda akan lebih banyak.

Gambar 5.1

Makin tinggi suhu benda, makin besar energi kalor yang dipancarkan.



Setelah melakukan eksperimen di atas, apa yang dapat Anda simpulkan. Makin tinggi suhu sebuah benda, makin besar pula energi kalor dipancarkan. Fenomena ini untuk kali pertamanya dikemukakan dan diselidiki oleh **Jeseph Stefan**, yang melakukan eksperimen untuk menghitung besar energi kalor yang dipancarkan oleh sebuah benda. Lalu, **Ludwig Boltzmann** merumuskan secara matematis banyaknya kalor (Q) yang dipancarkan oleh sebuah benda (P) selama selang waktu 1 sekon.

$$P = \frac{Q}{t} = e\sigma AT^4$$

dengan:

e = emisivitas benda

σ = konstanta Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

A = luas permukaan benda

T = suhu mutlak benda

Contoh Soal 5.1

Sebuah benda memiliki suhu 327°C . Jika konstanta emisivitas benda itu $\frac{4}{5}$, berapakah intensitas radiasi yang dipancarkan?

Jawab:

Diketahui: $T = (273 + 327) \text{ K} = 600 \text{ K}$;

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}; \text{ dan } e = \frac{4}{5}$$

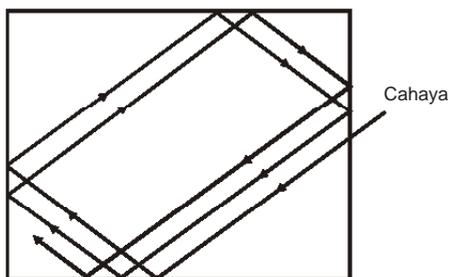
$$\begin{aligned} I &= e \sigma T^4 = \frac{4}{5} (5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4})(600 \text{ K})^4 \\ &= \frac{4}{5} (5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4})(1.296 \times 10^{11} \text{ K}^4) \\ &= 5.878.66 \text{ Wm}^{-2}. \end{aligned}$$

Jadi, intensitas radiasi yang dipancarkan benda tersebut sebesar $5.878.66 \text{ Wm}^{-2}$.

Emisivitas sebuah benda dapat dinyatakan sebagai kemampuan benda untuk memancarkan energi (gelombang elektromagnetik). Makin besar emisivitas benda maka makin mudah pula benda tersebut memancarkan energi. Nilai e adalah antara 0 dan 1.

Sebuah benda dapat menyerap semua radiasi yang mengenainya disebut benda hitam sempurna. Radiasi yang dihasilkan oleh sebuah benda hitam sempurna ketika dipanaskan disebut radiasi benda hitam. Kamu juga perlu mengetahui bahwa benda hitam sempurna merupakan suatu model. Jadi, sebenarnya tidak ada sebuah benda yang berperilaku sebagai benda hitam sempurna.

Benda hitam memiliki nilai $e = 1$. Berdasarkan definisi benda hitam sempurna ini, kita dapat membuat suatu model benda hitam yang menyerap hampir seluruh radiasi yang mengenainya. Coba Anda perhatikan gambar berikut.



Gambar 5.2

Pemantulan berulang dalam sebuah kaleng menghasilkan energi benda hitam.

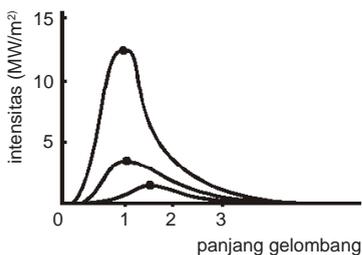
Bagaimana pemantulan yang terjadi pada cahaya ketika dimasukkan ke dalam sebuah kaleng yang pada salah satu sisinya terdapat sebuah lubang kecil. Kaleng kosong yang dilubangi dapat dikatakan sebagai sebuah benda hitam.

Mengapa lubang kecil pada kaleng tersebut terlihat gelap walaupun pada siang hari? Perlu Anda ketahui lubang yang terlihat gelap pada siang hari disebabkan cahaya yang masuk melalui lubang tersebut dipantulkan berulang kali di sekitar pantulan, banyaknya kalor (energi) yang diserap adalah 20% maka setelah sepuluh kali pemantulan kalor yang dibawa oleh cahaya yang keluar dari lubang tinggal sekitar 10% energi mula-mula. Inilah yang menyebabkan lubang kelihatan hitam, walaupun dinding bagian dalam kaleng mengkilap.

Uji Kemampuan 5.1

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Suhu tubuh seseorang 36 °C. Berapakah panjang gelombang di mana radiasi maksimum terjadi?
2. Pada kisaran suhu berapakah panjang gelombang maksimum radiasi benda hitam bervariasi dari 600 nm sampai 700 nm (cahaya tampak)?
3. Dua buah lampu pijar masing-masing memiliki suhu 27 °C dan 127 °C dan jari-jari lampu pertama dua kali jari-jari lampu kedua.



Gambar 5.3
Pergeseran Wien

B. Pergeseran Wien

Wilhelm Wien, seorang fisikawan Jerman, menemukan suatu hubungan empiris sederhana antara panjang gelombang yang dipancarkan untuk intensitas maksimum (λ_{maks}) sebuah benda dengan suhu mutlaknya (T) yang dikenal sebagai hukum pergeseran Wien, yaitu

$$\lambda_{maks} T = C = 2,898 \times 10^{-3} \text{ mK}$$

dengan:

C = tetapan pergeseran Wien

Grafik Gambar 5.3 merupakan grafik intensitas panjang gelombang suatu benda hitam sempurna untuk tiga jenis suhu.

Perhatikan pergeseran puncak–puncak spektrum panjang gelombang untuk intensitas maksimum λ_{maks} semakin kecil dengan bertambah besarnya suhu. Total energi kalor radiasi yang dipancarkan sebanding dengan luas daerah di bawah grafik.

Contoh Soal 5.2

Sebuah benda di panaskan sehingga suhunya 5.000 °C. Tentukan panjang gelombang pembawa intensitas radiasi maksimum yang dipancarkan benda tersebut.

Jawab:

Diketahui: $T = 5.000 \text{ }^\circ\text{C} = (5.000 + 273)\text{K} = 5.273 \text{ K}$

Maka, $\lambda_{maks}(5.273) = 2.898 \times 10^{-3} \text{ mK}$

$$\lambda_{maks} = \frac{2.898 \times 10^{-3} \text{ mK}}{5.273} = 5,50 \times 10^{-7} \text{ m}$$

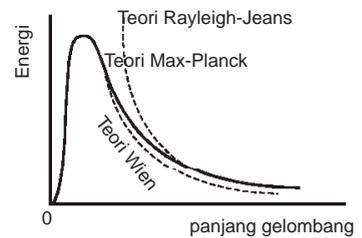
Jadi, panjang gelombang pembawa intensitas radiasi maksimum benda $5,50 \times 10^{-7} \text{ m}$.

C. Teori Rayleigh-Jeans

Rayleigh-Jeans menentukan hubungan energi radiasi dengan frekuensi gelombang. Hukum pergeseran Wien hanya menjelaskan hubungan antara energi radiasi terhadap panjang gelombang dengan cara mencari fungsi matematis yang sesuai dengan kurva (spektrum) sehingga tidak dapat menjelaskan tentang benda hitam. Raylight dan Jeans menjelaskan radiasi termal berdasarkan modus vibrasi (getaran) pada rongga benda hitam. Sesuai dengan hukum ekuipartisi energi maka setiap partikel dalam benda hitam akan mempunyai energi untuk setiap derajat kebebasannya yaitu sebesar:

$$E = \frac{1}{2} kT$$

Suhu mutlak T bersifat kontinu sehingga energi termal yang dipancarkannya juga akan bersifat kontinu. Maka, menurut Rayleigh-Jeans energi harus bersifat kontinu. Bentuk grafik yang diperoleh secara teoretis dengan bentuk grafik secara eksperimen berbeda. Hanya akan sesuai untuk



Gambar 5.4

Perbandingan teori Wien, Reyleigh-Jeans, dan Max Planck untuk menjelaskan radiasi benda hitam.

daerah frekuensi yang rendah atau panjang gelombang yang panjang sehingga yang sesuai dengan hasil percobaan radiasi benda hitam adalah hukum pergeseran Wien.

D. Teori Kuantum Max Planck

Max Planck mendapatkan fakta bahwa rumus Wien cocok untuk radiasi benda hitam, jika dilakukan pengembangan secara teoretis. Planck juga berhasil memperbaiki teori Rayleigh-Jeans yang akhirnya akan sesuai dengan spektrum radiasi benda hitam. Menurut Planck, energi merupakan paket-paket energi yang disebut dengan kuantum, dapat dikatakan pula bahwa energi bersifat diskret. Energi gelombang elektromagnetik dalam benda hitam dirumuskan dengan:

$$E = nhf$$

dengan:

E = energi (joule)

h = konstanta Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ joule sekon)

f = frekuensi (Hz)

n = jumlah kuantum

Menurut Max Planck, cahaya merupakan gelombang elektromagnetik yang merupakan kuantum yang bergerak dengan kecepatan cahaya. Kuantum-kuantum tersebut dinamakan dengan foton. Foton memiliki dua sifat, yaitu sebagai gelombang dan sebagai partikel.

E. Efek Fotolistrik

Efek fotolistrik dijelaskan oleh Einstein sebagai berikut. Pada sebuah tabung hampa yang dilengkapi dengan dua buah elektrode, yaitu anode dan katode, kemudian dihubungkan dengan sumber tegangan searah (DC). Meskipun dengan tegangan yang digunakan adalah kecil, tetap terdapat aliran arus pada rangkaian. Jika tegangan antara elektrode dalam tabung diperbesar, maka arus yang mengalir pada rangkaian akan meningkat. Akan tetapi

peningkatan arus tersebut tidak berlangsung terus. Sampai pada tegangan tertentu, arus akan bernilai konstan yang disebut dengan arus jenuh. Jika tabung tersebut dikenai cahaya, maka arus akan bertambah, karena cahaya memiliki energi yang mampu menumbuk dan mengeluarkan elektron dari katode sehingga elektron mengalir menuju ke anode menjadi arus listrik. Jika intensitas cahayanya dilipatduakan maka arus konstan pun akan tambah menjadi dua kali. Jika sumber tegangan dibalik maka arus yang tadinya konstan akan berangsur-angsur menurun seiring dengan kenaikan tegangan, sampai pada akhirnya tidak mengalir. Tidak adanya arus listrik tersebut terjadi pada frekuensi tertentu (f_0) yang disebut *frekuensi ambang*.

Percobaan tersebut menunjukkan bahwa cahaya berperan membantu melepaskan elektron dari permukaan logam. Energi kinetik maksimum elektron yang lepas tidak bergantung pada intensitas cahaya yang mengenai logam, tetapi bergantung pada frekuensi cahaya yang mengenainya.

Robert A. Millikan melakukan percobaan dengan mengubah-ubah frekuensi cahaya yang digunakan. Dari percobaannya, diperoleh gerak di samping. Dari percobaan itu dapat disimpulkan bahwa fotoelektron hanya bergantung pada frekuensi foton yang mengenainya dan pada setiap bahan frekuensi ambangnya (f_0) akan berbeda-beda.

Albert Einstein menerangkan tentang fotoelektron dengan menggunakan hipotesis dari **Max Planck**, yaitu cahaya merupakan paket-paket energi (foton) yang besarnya $E = hf$. Setiap elektron foto hanya mampu menangkap satu foton. Energi foton digunakan untuk melepaskan elektron dari permukaan logam, dan sisa energinya digunakan untuk bergerak atau sebagai energi kinetik. Dari hipotesis itu dapat dirumuskan:

$$E = W_0 + E_k$$

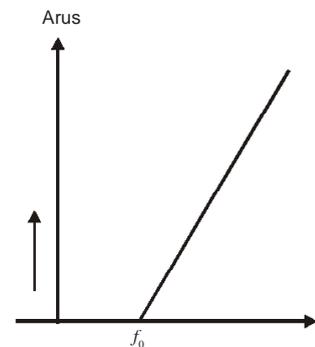
dengan:

E : energi foton

W_0 : energi ambang elektron

E_k : energi kinetik elektron

Penjelasan dari Einstein memperkuat hipotesis Planck bahwa cahaya merambat dalam bentuk paket-paket energi yang disebut dengan foton. Cahaya bersifat sebagai partikel



Gambar 5.5

Grafik hubungan antara v_0 dan f_0 .

dan sebagai gelombang karena cahaya juga melakukan peristiwa interferensi, difraksi, dan polarisasi. Selain itu, cahaya juga termasuk salah satu gelombang elektromagnetik.

Eksperimen 5.1

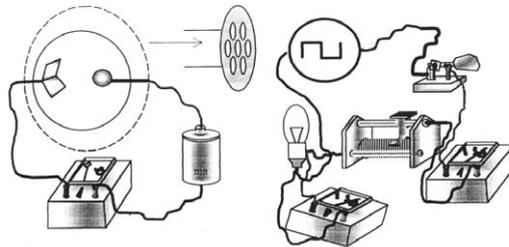
Daya Tembus Gelombang Elektromagnetik pada Berbagai Bahan

Alat dan Bahan:

- LDR sebagai pengganti tabung efek foto listrik
- baterai
- lampu
- resistor
- resistor variabel
- pembangkit listrik
- amperemeter dan voltmeter
- pemutus arus

Langkah-Langkah Eksperimen:

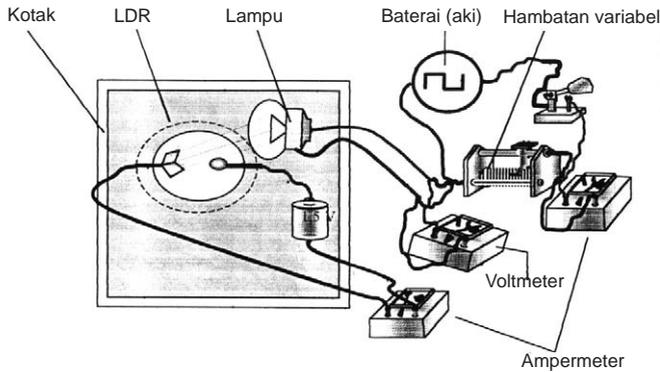
1. Coba Anda sediakan alat dan bahan seperti gambar di atas.
2. Rangkaikan model alat efek foto listrik sesuai dengan gambar 1. Model sama dengan model luks meter. Masukkan rangkaian ini pada kotak tanpa cahaya.



Gambar 5.6

3. Rangkaikan model alat pembangkit cahaya dengan lampu yang dapat diubah kuat pencahayaannya. Rangkaian ini sesuai dengan gambar desain gambar 2. Lampu pembangkit cahaya masuk ke dalam kotak sehingga dapat mencahayai LDR.
4. Dalam kondisi rangkaian pembangkit cahaya *off* atau kondisi tanpa cahaya catatlah harga yang ditunjukkan oleh amperemeter I_{LDR} .
5. Tempatkan tahanan variabel pada posisi maksimum dan *on*-kan saklar, amati dan ukur harga amperemeter I_{LDR} , amperemeter I_{chy} , dan voltmeter V_{chy} .
6. Geser resistor variabel hingga harga tahanan lebih kecil amati dan ukur harga amperemeter I_{LDR} , amperemeter I_{chy} , dan voltmeter V_{chy} .

- Ulangi langkah 6 untuk harga resistor variabel menjadi semakin kecil.



Gambar 5.7

- Catatlah data yang diperoleh pada tabel yang tersedia.

No	I_{chy}	V_{chy}	I_{LDR}	Keterangan

- Gambarkan grafik hubungan antara I_{LDR} dengan V_{chy} .
- Apa yang dapat disimpulkan dari eksperimen ini.

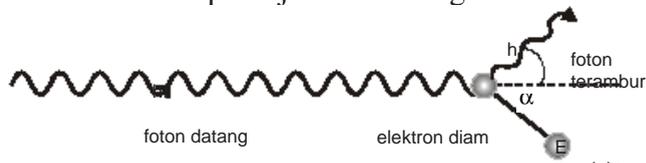
F. Efek Compton

Telah Anda ketahui bahwa cahaya atau gelombang elektromagnetik yang menembus kaca, panjang gelombang dan frekuensinya setelah keluar dari kaca tidak mengalami perubahan. Dengan kata lain, gelombang itu tidak mengalami perubahan energi. Pernyataan ini kontradiktif dengan apa yang dialami oleh Compton. Pada 1923, Compton melakukan percobaan dengan menjatuhkan sinar-X yang berasal dari bahan radioaktif pada lempengan tipis. Hasil pengamatannya menunjukkan bahwa setelah keluar dari lempengan gelombang elektromagnetik mengalami hamburan. Terbukti panjang gelombang bertambah panjang. Hal itu dirasa aneh, karena teori klasik yang ada pada saat itu tidak dapat menjelaskan peristiwa tersebut. Untuk menjelaskan masalah itu, Compton menganggap foton (gelombang elektromagnetik) sebagai materi.

Karena dianggap sebagai materi, foton mempunyai momentum sehingga tumbukan antara foton sebagai materi dan elektron dalam lempengan berlaku hukum kekekalan momentum.

Peristiwa itu dapat dijelaskan sebagai berikut.

Gambar 5.8
Skema percobaan tumbukan foton dengan elektron oleh Compton.



Dengan persamaan kesetaraan energi-massa dari Einstein, diperoleh:

$$E = m \cdot c^2$$

$$E = mc \cdot c = p \cdot c$$

Mengingat energi foton Planck $E = hf$ maka momentum foton dapat ditentukan:

$$p = \frac{hf}{c} \quad \text{atau} \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

dengan:

p = momentum foton (Ns)

h = tetapan Planck (Js)

f = frekuensi gelombang elektromagnetik (Hz)

c = laju cahaya (m/s)

λ = panjang gelombang foton (m)

Karena gelombang foton setelah tumbukan bertambah panjang, berarti energi foton berkurang $E = hf - hf'$, dalam hal ini $f > f'$ dan $\lambda < \lambda'$

Melalui penurunan rumus yang agak panjang (tidak diuraikan di sini) diperoleh persamaan:

$$\lambda < \lambda' = \frac{h}{mc} (1 - \cos\theta)$$

dengan:

λ' = panjang gelombang foton setelah tumbukan

λ = panjang gelombang foton sebelum tumbukan

h = tetapan Planck ($6,63 \times 10^{-34}$ Js)

m = massa elektron ($9,1 \times 10^{-31}$ kg)

c = laju cahaya (3×10^8 m/s)

θ = sudut penyimpangan foton terhadap arah semula

Mengingat mc merupakan konstanta dan dapat ditulis sebagai λ_c (λ_c = panjang gelombang Compton untuk elektron). Maka,

$$\lambda_c = \frac{h}{mc} = \frac{(6,63 \times 10^{-34})}{(9,1 \times 10^{-31})(3 \times 10^8)}$$

$$\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 2,43 \text{ pm} = 2,43 \cdot 10^{-2} \text{ \AA}.$$

Dengan demikian, persamaan dapat dituliskan:

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$

Apabila sudut $\theta = 0^\circ$, panjang gelombang foton terhambur akan minimum (paling pendek).

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta) = \lambda_c (1 - 1)$$

$$\lambda'_{\min} = \lambda$$

Jika panjang gelombang foton yang terhambur minimum, maka energi kinetik elektron yang terpental (tertumbuk foton) juga minimum. Elektron yang tertumbuk foton akan diam.

Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$E_\lambda = E'_\lambda + Ek_e$$

$$Ek_e = h(f - f')$$

$$Ek_e = hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right)$$

karena $\lambda' = \lambda$ maka $Ek_e = 0$ (elektron tetap diam).

Untuk sudut $\theta = 180^\circ$, panjang gelombang foton yang terhambur maksimum (paling panjang).

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos 180^\circ) = \lambda_c (1 - (-1)) = \lambda_c \cdot 2$$

$$\lambda'_{\max} = \lambda + 2\lambda_c$$

Jika panjang gelombang foton yang terhambur maksimum, maka elektron terpental maksimum. Artinya, energi kinetik elektron maksimum.

$$E_{\lambda} = E'_{\lambda} + Ek_e$$

$$Ek_e = h(f - f')$$

$$Ek_e = hc \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right)$$

Dari percobaan tersebut, Compton berkesimpulan bahwa gelombang elektromagnetik (termasuk di dalamnya cahaya) mempunyai sifat kembar, yaitu sebagai gelombang dan sebagai materi atau partikel. Pada peristiwa interferensi, difraksi, dan polarisasi lebih tepat apabila cahaya dipandang sebagai gelombang, sedangkan pada peristiwa efek fotolistrik dan efek Compton lebih tepat apabila cahaya dipandang sebagai partikel.

Contoh Soal 5.3

Pada sebuah percobaan efek fotolistrik, arus mengalir pada sumbu amperemeter. Ketika potensial penghenti bernilai 2,5 V, amperemeter menunjukkan angka nol. Tentukanlah energi kinetik elektron yang terlepas pada efek fotolistrik tersebut.

Jawab:

Diketahui: $V_s = 2,5 \text{ V}$

Energi potensial pengganti (E_k) $eV = (1,61 \times 10^{-19} \text{ C})(2,5 \text{ V})$

$$E_k = 4,0 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Jadi, energi kinetik elektronnya $4,0 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Uji Kemampuan 5.2

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Lampu natrium 20 W memancarkan cahaya kuning dengan panjang gelombang 589 nm. Berapakah jumlah foton yang dipancarkan lampu itu setiap sekon?
2. Sebuah lampu pijar 100 W memancarkan cahaya dengan panjang gelombang 6600 Å. Jika energi lampu pijar yang berubah menjadi energi cahaya 6% dan konstanta Planck $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$, berapakah jumlah foton yang dipancarkan oleh lampu setiap sekon?
3. Elektron foto dipancarkan dengan kecepatan nol dari suatu permukaan. Jika panjang gelombang sinar adalah 780 nm dan kecepatan cahaya $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, tentukan besarnya fungsi kerja logam tersebut.
4. Cahaya dengan panjang gelombang 60 nm meradiasi permukaan logam yang memiliki fungsi kerja $0,3 \times 10^{-18} \text{ J}$. Jika $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ dan $h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$, tentukan:
 - a. energi kinetik maksimum elektron-fotonya;
 - b. potensial henti.

G. Teori Gelombang De Broglie

Cahaya memiliki sifat kembar, yaitu sebagai gelombang sekaligus sebagai partikel (materi). Berangkat dari sifat kembar cahaya, **Louise de Broglie** berpikiran, apa salahnya jika materi (partikel) juga memiliki sifat gelombang. Dalam rangka menindaklanjuti pikirannya itu, de Broglie membuat hipotesis bahwa partikel elektron juga mempunyai sifat gelombang. Untuk membuktikan hipotesisnya itu, de Broglie mencari hubungan antara ciri khas besaran gelombang, yaitu panjang gelombang dan besaran partikel, yaitu momentum. Mengingat momentum foton $p = \frac{h}{\lambda}$ maka panjang gelombang partikel yang mempunyai momentum p sehingga diperoleh persamaan de Broglie yaitu:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

dengan:

λ = panjang gelombang partikel (panjang gelombang de Broglie)

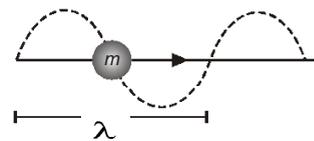
h = tetapan Planck

p = momentum partikel

m = massa partikel

v = kecepatan partikel

Suatu hipotesis tidak dapat diterima sebagai teori sebelum dibuktikan dengan eksperimen. Untuk itu, pada 1927 Davisson dan Genner melakukan eksperimen untuk membuktikan hipotesis Louise de Broglie itu. Untuk membuktikan hipotesis tersebut dibuat suatu alat yang dapat menunjukkan gejala adanya gelombang, dalam hal ini *difraksi*. Pada percobaan difraksi cahaya digunakan kisi difraksi biasa. Namun, pada percobaan Davisson-Genner, materi yang digunakan adalah elektron dan sebagai kisinya digunakan kisi yang lebarnya kira-kira sama dengan panjang gelombang elektron yang digunakan (panjang gelombang de Broglie). Jika sebuah electron yang dipercepat dengan tegangan 54 volt dijatuhkan pada kisi dari kristal nikel,



Gambar 5.9

De Broglie mencari hubungan antara ciri khas besaran gelombang, yaitu panjang gelombang dan besaran partikel.

diperoleh pola difraksi yang tepat sama dengan teori yang diramalkan oleh de Broglie. Dalam hal ini, energi kinetik elektron sama dengan energi potensial listrik.

$$Ek = e \cdot V = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 54 = 8,64 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

Selanjutnya, momentum elektron dapat dihitung sebagai berikut.

$$p = m \cdot v; \text{ mengingat } Ek = \frac{1}{2} mv^2 \text{ maka:}$$

$$p = \sqrt{2 \cdot m \cdot Ek}$$

$$p = \sqrt{2 \times 9,1 \times 10^{-31} \times 8,64 \times 10^{-18}}$$

$$p = 3,97 \cdot 10^{-24} \text{ kg m/s}$$

Jika momentumnya diketahui, panjang gelombang de Broglie dapat dihitung:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{3,97 \times 10^{-24}} = 1,67 \times 10^{-10} = 1,67 \text{ \AA}$$

Hasil perhitungan di atas menunjukkan bahwa orde panjang gelombang de Broglie sama dengan jarak antaratom dalam kristal. Hasil percobaan yang dilakukan oleh Devisson dan Genner menggunakan partikel elektron menunjukkan pola difraksi yang tepat sama dengan pola difraksi sinar-X pada panjang gelombang yang sama. Dengan demikian, partikel seperti elektron juga dapat menunjukkan sifat gelombang seperti yang diramalkan de Broglie.

Uji Kemampuan 5.3

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Seberkas sinar-X dengan panjang gelombang $5 \times 10^{-14} \text{ m}$ menumbuk proton bermassa $1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ yang diam. Jika setelah tumbukan sinar-X dibelokkan sejauh 110° terhadap arah semula, hitunglah panjang gelombang sinar-X yang tersembur ini.
2. Sebuah foton ($\lambda = 0,400 \text{ nm}$) menumbuk elektron yang diam. Foton tersebut terhambur sejauh 150° dari arahnya semula. Hitunglah kecepatan dan panjang gelombang foton setelah tumbukan.

Ringkasan

Menurut Stefan–Boltzman, jumlah energi radiasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan per satuan waktu per satuan luas dari sebuah benda akan berbanding lurus dengan pangkat empat dari suhu mutlaknya $I = e\sigma AT^4$.

Menurut Wien bahwa perkalian antara panjang gelombang maksimum dengan sudut mutlaknya merupakan hasil yang tetap $\lambda_{maks} \cdot T = C$.

Raylight dan Jeans menjelaskan radiasi termal berdasarkan modus vibrasi (getaran) pada rongga benda hitam. Sesuai dengan hukum ekuipartisi energi. Maka, setiap partikel dalam benda hitam

akan memiliki energi sebesar $E = \frac{1}{2}kT$ untuk setiap derajat kebebasannya.

Menurut Planck, energi merupakan paket-paket energi yang disebut dengan kuantum, dapat dikatakan pula bahwa energi bersifat diskret yang dirumuskan $E = n h f$.

Menurut Max Planck, cahaya merupakan gelombang elektromagnetik yang merupakan kuantum bergerak dengan kecepatan cahaya yang disebut foton dan memiliki dua sifat yaitu sebagai gelombang dan partikel.

Energi foton digunakan untuk melepaskan electron dari permukaan logam dan sisa energinya digunakan untuk bergerak atau sebagai energi kinetik sehingga dapat dirumuskan $E = W_0 + E_k$.

Penjelasan dari Einstein memperkuat hipotesisi Planck bahwa cahaya merambat dalam bentuk paket-paket energi yang disebut foton sehingga cahaya bersifat sebagai partikel dan sebagai gelombang.

Panjang gelombang Compton dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

Jika panjang gelombang foton yang terhambur minimum, energi kinetik electron yang terpental (tertumbuk foton) juga akan minimum. Dalam hal ini, electron yang tertumbuk foton akan diam.

Compton menyebutkan bahwa gelombang elektromagnetik (termasuk di dalamnya cahaya) memiliki sifat kembar yaitu sebagai gelombang dan sebagai materi atau partikel.

De Broglie membuat hipotesis bahwa partikel electron juga memiliki sifat gelombang.

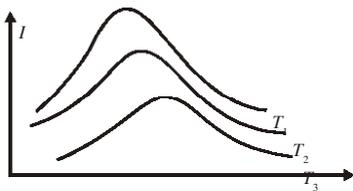
Mengingat momentum foton $p = \frac{h}{\lambda}$ maka panjang gelombang partikel yang memiliki momentum p adalah $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$

Uji Kompetensi Bab 5

A. Pilihlah satu jawaban yang benar.

- Menurut teori kuantum berkas cahaya terdiri atas foton. Intensitas berkas cahaya ini
 - berbanding lurus dengan energi foton
 - berbanding lurus dengan akar energi foton
 - berbanding lurus dengan banyaknya foton
 - berbanding lurus dengan kuadrat banyaknya foton
 - tidak bergantung pada energi dan banyaknya foton

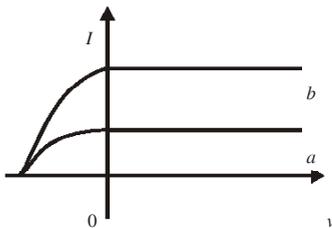
- Berdasarkan grafik intensitas (I) terhadap panjang gelombang (λ) seperti di bawah dapat disimpulkan bahwa



- $T_1 = \frac{1}{2}T_2 = \frac{1}{4}T_3$
 - $T_1 > T_2 > T_3$
 - $T_1 < T_2; T_1 > T_3$
 - $T_1 < T_2 < T_3$
- Seseorang mendeteksi 5 foton pada panjang gelombang 5500 \AA dalam waktu 90 milidetik. Daya yang diterima mata orang tersebut ... ($h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$; $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)
 - $2 \times 10^{-22} \text{ W}$
 - $2 \times 10^{-20} \text{ W}$
 - $2 \times 10^{-19} \text{ W}$
 - $2 \times 10^{-17} \text{ W}$
 - $2 \times 10^{-15} \text{ W}$
 - Sebuah benda hitam suhunya 2000 K. Jika konstanta Wien $= 2,898 \times 10^{-3} \text{ mK}$ maka rapat energi maksimum yang dipancarkan benda itu terletak pada panjang gelombang λ_{maks} sebesar

- $1,4 \text{ \mu m}$
 - $2,9 \text{ \mu m}$
 - $5,8 \text{ \mu m}$
 - $7,3 \text{ \mu m}$
 - $12,4 \text{ \mu m}$
- Permukaan bumi menerima radiasi matahari rata-rata $1,2 \text{ kW/m}^2$ saat terik. Jika panjang gelombang rata-rata radiasi ini 6620 \AA maka banyak foton per detik dalam berkas sinar matahari seluas 1 cm^2 secara tegak lurus adalah
 - 5×10^{17}
 - 4×10^{17}
 - 3×10^{17}
 - 2×10^{17}
 - 1×10^{17}
 - Kuantum energi yang terkandung di dalam sinar ultraviolet dengan panjang gelombang 3300 \AA , konstanta Planck $6,6 \times 10^{-34} \text{ J sekon}$ dan kecepatan cahaya $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ adalah
 - $2 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $3 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $3,3 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $6 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $3 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - Panjang gelombang cahaya yang dipancarkan oleh lampu monokromatis 100 W adalah $5,5 \times 10^{-7} \text{ m}$. Celah foton (partikel cahaya) per sekon yang dipancarkannya sekitar
 - $2,8 \times 10^{22}/\text{s}$
 - $2,0 \times 10^{23}/\text{s}$
 - $2,6 \times 10^{20}/\text{s}$
 - $2,8 \times 10^{20}/\text{s}$
 - $2,0 \times 10^{20}/\text{s}$
 - Ketika electron foto dikeluarkan dari suatu permukaan logam oleh radiasi gelombang elektromagnetik, kelajuan maksimumnya bergantung pada

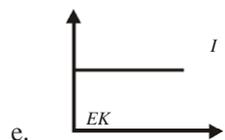
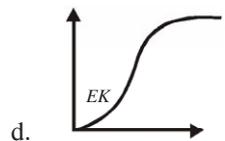
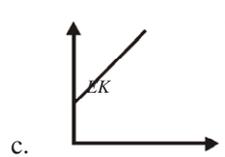
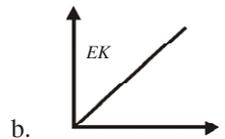
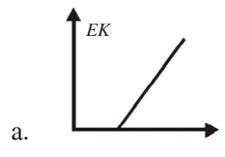
- a. frekuensi radiasi
 - b. intensitas radiasi
 - c. frekuensi dan intensitas radiasi
 - d. frekuensi radiasi dan fungsi kerja logam
 - d. frekuensi, intensitas radiasi, dan fungsi kerja logam
9. Permukaan logam tertentu memiliki fungsi kerja W joule. Jika konstanta Planck h joule sekon maka energi maksimum fotoelektron yang dihasilkan oleh cahaya berfrekuensi ν Hz adalah ... J.
- a. $W + h\nu$
 - b. $W/(h\nu)$
 - c. $W - h\nu$
 - d. $h\nu/W$
 - e. $h\nu - W$
10. Fungsi kerja aluminium adalah 2,3 eV. Cahaya dengan panjang gelombang 660 nm akan mengeluarkan electron-foto dengan energi kinetic maksimum (laju cahaya $c = 3 \times 10^8$ m/s, konstanta Planck = $6,6 \times 10^{-34}$ Js, 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J)
- a. 0,5 eV
 - b. 0,6 eV
 - c. 2,9 eV
 - d. 1,8 eV
 - e. negatif, yaitu tidak mampu mengeluarkan elektron-foto
11. Perhatikan gambar berikut ini.



Pada gejala fotolistrik diperoleh grafik hubungan I (kuat arus) yang timbul terhadap V (tegangan listrik) seperti gambar di atas. Upaya yang dilakukan agar grafik a menjadi grafik b

- a. mengurangi intensitas sinarnya
- b. menambah intensitas sinarnya
- c. menaikkan frekuensi sinarnya
- d. menurunkan frekuensi sinarnya
- e. mengganti logam yang disinari

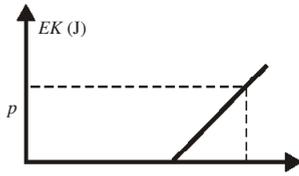
12. Jika sinar ungu berfrekuensi 10^{16} Hz dijatuhkan pada permukaan logam yang memiliki energi ambang $2/3$ kali kuantum energi sinar ungu dan tetapan Planck = $6,6 \times 10^{-34}$ Js maka energi kinetic electron yang lepas adalah
- a. $1,1 \times 10^{-18}$ J
 - b. $2,2 \times 10^{-18}$ J
 - c. $3,3 \times 10^{-18}$ J
 - d. $4,4 \times 10^{-18}$ J
 - e. $6,6 \times 10^{-18}$ J
13. Grafik yang menunjukkan hubungan antara energi kinetic fotoelektrik (EK) dan intensitas I foton pada proses fotolistrik adalah



14. Seberkas sinar berfrekuensi $f = 10^{15}$ Hz jatuh pada logam. Fungsi kerja logam $2,9 \times 10^{-19}$ J, maka potensial henti (*stopping potensial*) dari electron ($h = 6,6 \times 10^{-34}$ Js, $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ kg, $q_e = 1,6 \times 10^{-19}$ C) adalah

- a. 4,14 V
- b. 2,33 V
- c. 1,81 V
- d. 3,73 V
- e. 4,98 V

15. Perhatikan gambar berikut ini.



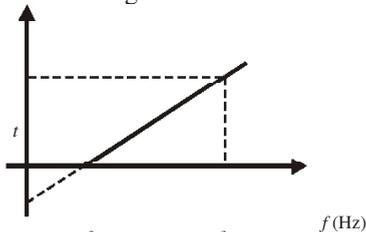
Gambar di atas adalah grafik hubungan EK (energi kinetik maksimum) fotoelektron terhadap f (frekuensi) sinar yang digunakan pada efek fotolistrik. Nilai p pada grafik tersebut adalah ... J.

- a. $2,64 \times 10^{-23}$
- b. $3,3 \times 10^{-30}$
- c. $6,6 \times 10^{-20}$
- d. $2,64 \times 10^{-19}$
- e. $3,3 \times 10^{-19}$

16. Jika cahaya dengan panjang gelombang dijatuhkan pada permukaan logam dan arus yang melalui sel dikurangi sehingga menjadi nol oleh beda potensial V yang membuat electron berpolarisasi negative terhadap permukaan logam. Maka, energi kinetik maksimum electron-electron yang dikeluarkan adalah

- a. $\frac{h\lambda}{c}$
- b. $\frac{hc}{\lambda}$
- c. Ve
- d. $Ve - \frac{hc}{\lambda}$
- e. $Ve - \frac{h\lambda}{c}$

17. Perhatikan gambar berikut ini.



Hubungan energi kinetik electron dan frekuensi pada gejala fotolistrik terlihat pada grafik di atas. Jika konstanta Planck = h , besarnya fungsi kerja logam adalah

- a. $0,25 hf_A$
- b. $0,5 hf_A$
- c. hf_A
- d. $0,5 hf_B$
- e. hf_B

18. Panjang gelombang sinar electron pada mikroskop electron adalah

- a. berbanding lurus dengan akar tegangan dipakai
- b. berbanding lurus dengan akar tegangan yang dipakai
- c. berbanding terbalik dengan tegangan yang dipakai
- d. berbanding terbalik dengan kuadrat tegangan yang dipakai
- e. berbanding terbalik dengan akar tegangan yang dipakai

19. Frekuensi ambang natrium adalah $4,4 \times 10^{14}$ Hz. Besarnya potensial penghenti dalam volt bagi natrium saat disinari dengan cahaya yang frekuensinya $6,0 \times 10^{14}$ Hz adalah

- a. 0,34
- b. 0,40
- c. 0,44
- d. 0,66
- e. 0,99

20. Sebuah elektron dan sebuah foton memiliki panjang gelombang yang sama maka

- a. momentum elektron lebih kecil daripada momentum foton
- b. momentum elektron lebih besar daripada momentum foton
- c. momentum elektron sama dengan momentum foton
- d. energi elektron lebih kecil daripada energi foton
- e. energi elektron lebih besar daripada energi foton

B. Soal Uraian

Jawablah pertanyaan-pertanyaan dibawah ini dengan benar.

1. Pemancar radio 100 W bekerja pada frekuensi 880 kHz, berapa banyak foton per detik yang dipancarkannya?
2. Tentukan nilai perbandingan antara energi kalor radiasi per sekon yang dipancarkan oleh sebuah benda hitam jika dipanaskan pada suhu 4.000 K dan 2.000 K.
3. Intensitas cahaya Matahari di permukaan Bumi adalah kira-kira 1.400 W/m^2 . Dengan menganggap energi foton rata-rata 2 eV (yang bersesuaian dengan panjang gelombang kira-kira 600 nm), hitunglah jumlah foton yang mengenai seluas 1 cm^2 dalam satu sekon.
4. Sebuah benda hitam memiliki suhu 1.727°C . Tentukan panjang gelombang untuk rapat energi maksimum yang dipancarkan benda itu.
5. Energi kinetik fotoelektron berislar dari nol hingga $4,0 \times 10^{-19} \text{ J}$. Jika cahaya dengan panjang gelombang 3.000 \AA jatuh pada sebuah permukaan, berapakah potensial henti cahaya ini?
6. Tentukan energi foton dalam seberkas cahaya yang memiliki panjang gelombang 544 nm.
7. Panjang gelombang ambang suatu bahan adalah 5.000 \AA . Carilah fungsi kerjanya.
8. Sebuah sumber cahaya memancarkan cahaya hijau 100 W pada panjang gelombang 500 nm. Berapa jumlah foton yang dipancarkan dari sumber per sekon?
9. Tentukan energi kinetik maksimum electron-elektron yang dipancarkan dari sebuah permukaan dengan panjang gelombang ambang 6.000 \AA ketika cahaya 4.000 \AA jatuh pada permukaan itu.
10. Massa neutron kira-kira 2.000 kali massa electron. Berapa kecepatan neutron agar panjang gelombang yang dihasilkan sama dengan panjang gelombang electron yang berkecepatan $1 \times 10^7 \text{ m/s}$?

Analisa Mikroskop Elektron



Berdasarkan sifat gelombang elektron bahwa elektron dapat digunakan untuk melihat benda yang sangat kecil. Maka, para ilmuwan membuat mikroskop elektron. Saat ini mikroskop elektron merupakan suatu alat penelitian yang sangat penting. Coba Anda perhatikan gambar disamping yang menggambarkan fitur mikroskop elektron.

Elektron dari filament yang dipanaskan (*electron gun*) dipercepat oleh beda potensial yang besar. Berkas electron dibuat sejajar dan difokuskan oleh magnet yang didesain khusus yang berfungsi sebagai lensa (biasa disebut lensa magnetik). Energi elektron sebesar 100 keV mampu menghasilkan panjang gelombang kira-kira 0,004 nm. Elektron ini mengenai sasaran (target) yang dibuat sangat tipis dengan tujuan agar berkas yang dihantarkan tidak diperlambat atau dihamburkan terlalu banyak. Setelah mengenai target, elektron kemudian difokuskan oleh lensa magnetik kedua yang ekuivalen dengan lensa objektif dalam mikroskop biasa.

Kasus

Suatu sinar dengan panjang gelombang 0,140 nm dihamburkan dari sebuah benda yang dilihat dalam mikroskop elektron. Berapakah panjang gelombang sinar terhambur jika sudut hamburan dari benda itu 90°?

Solusi

Sesuai dengan persamaan berikut

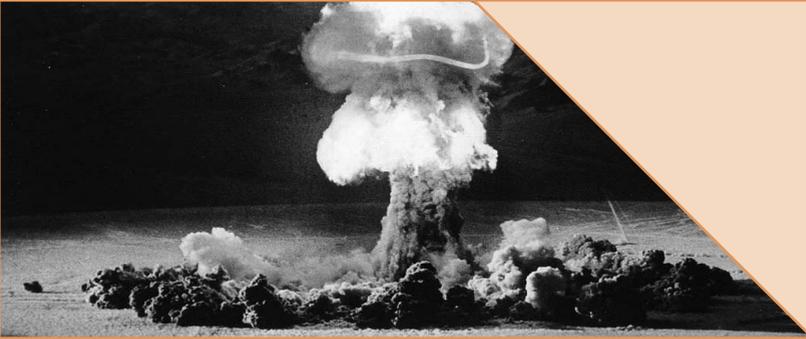
$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

Untuk $\theta = 90^\circ$ maka $\cos \theta = 0$ sehingga

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{mc}$$

$$= 0,140 \text{ nm} + \frac{6,63 \times 10^{-34}}{(9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})(3,0 \times 10^8 \text{ m/s})} \lambda' = 0,142 \text{ nm}$$

Bab 6



Sumber: www.atomicbomb.com

Fisika Atom

Rumah boneka yang terdiri atas beberapa tingkat dan tiap tingkat terdiri atas beberapa kamar. Energi elektron dalam atom pun bertingkat-tingkat. Untuk menepatkan elektron ke setiap “kamar”, harus memenuhi aturan tertentu.

Jika suatu batuan dihancurkan, batuan itu terpecah-pecah menjadi partikel-partikel kecil. Apa pun benda yang kita lihat tersusun dari bagian-bagian kecil materi. Sejak zaman purba, orang telah mencari satuan dasar dari materi. Pada zaman dahulu, orang-orang Yunani menganggap bahwa materi tersusun dari berbagai gabungan dari empat unsur dasar, yaitu tanah, api, udara, dan air. Akan tetapi, filsuf Yunani **Demokritus** memiliki teori lain. Ia mengemukakan bahwa materi tersusun dari partikel-partikel kecil yang disebut atom, yang berarti “tidak dapat dibagi-bagi”. Selama hampir 2.000 tahun, teori Demokritus diabaikan. Baru pada 1802, seorang kimiawan-fisikawan Inggris **John Dalton**, menghidupkan kembali teori atom itu.

Standar Kompetensi

Menganalisis berbagai besaran fisis pada gejala kuantum dan batas-batas berlakunya relativitas Einstein dalam paradigma fisika modern

Kompetensi Dasar

Mendiskripsikan perkembangan teori atom.

- A. Perkembangan Teori Atom
- B. Atom Berelektron Banyak

Kata Kunci

Atom
Bohr
Elektron

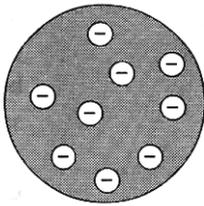
A. Perkembangan Teori Atom

Istilah atom telah dikenal oleh bangsa Yunani sebelum Masehi. Ahli fisika Yunani bernama Leucippus pada abad ke-5 SM dan Democritus (460-370 SM) telah mengemukakan teori tentang atom. Mereka menggambarkan atom sebagai materi terkecil yang sedemikian kecilnya sehingga tidak dibagi-bagi lagi.

1. Model Atom Dalton

Perkembangan selanjutnya yang dicatat sejarah ilmu pengetahuan adalah konsep atom yang dikemukakan oleh **Joh Dalton** (1766-1844). Dalton mengemukakan teorinya sebagai berikut.

- Atom merupakan zat yang tidak dapat dibagi-bagi.
- Atom suatu unsur tidak dapat berubah menjadi unsur lain. Misalnya, atom aluminium tidak mungkin berubah menjadi atom besi atau sebaliknya.
- Dua atom atau lebih yang berasal dari unsur-unsur yang berlainan, dapat bersenyawa membentuk molekul. Misalnya atom hidrogen dan oksigen membentuk molekul air (H_2O).
- Atom-atom yang bersenyawa dalam molekul memiliki perbandingan tertentu dan jumlah keseluruhan yang tetap. Jumlah massa sebelum reaksi dan sesudah reaksi adalah sama.
- Jika dua atom membentuk dua senyawa atau lebih maka atom-atom yang sama dalam kedua senyawa itu memiliki perbandingan yang sederhana.



Gambar 6.1

Model atom yang dikemukakan oleh Thomson.

2. Model Atom Thomson

Perkembangan ilmu pengetahuan selanjutnya menunjukkan bahwa ternyata atom masih dapat dibagi lagi. Dengan sendirinya fakta tersebut menggugurkan teori atom Dalton karena tidak sesuai dengan fakta tersebut.

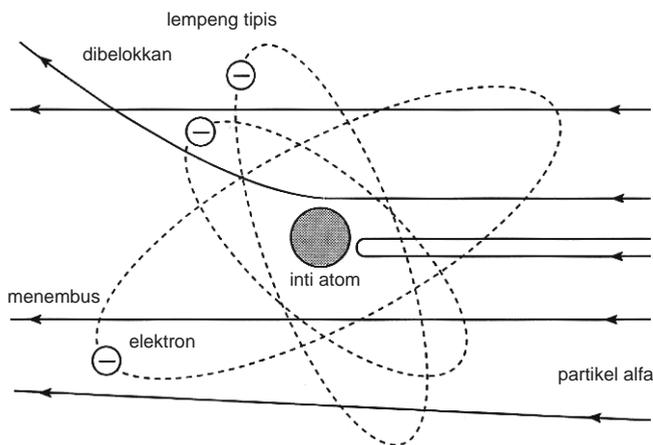
Penemuan elektron yang bermuatan listrik negatif oleh J.J. Thomson dengan menggunakan tabung sinar katode adalah salah satu fakta bahwa atom tersusun dari partikel-partikel penyusun atom. Thomson pun berhasil menemukan suatu partikel bermuatan positif dari percobaannya dengan

menggunakan sinar katode yang berisi gas hidrogen bertekanan rendah. Thomson menyebut partikel bermuatan positif tersebut sebagai proton. Atas dasar penemuan tersebut, ia kemudian menyusun model atom yang dikenal sebagai teori atom Thomson. Teori ini menyebutkan bahwa atom memiliki muatan-muatan listrik positif (proton) yang menyebar merata di seluruh bagian atom. Adapun elektron merupakan partikel negatif yang tersebar di antara proton-proton dan berperan menetralkan muatan atom secara keseluruhan.

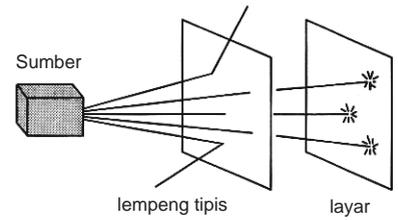
Model atom Thomson ini sering dinamakan sebagai model kue puding prem atau roti kismis. Karena elektron-elektron tersebar di seluruh atom seperti halnya kismis yang menempel pada roti.

3. Model Atom Rutherford

Teori atom Thomson pada 1911 diuji oleh seorang ahli fisika yang berasal dari Inggris, **Ernest Rutherford**. Ia menguji kebenaran teori Thomson dengan melakukan percobaan menggunakan partikel alfa yang ditembakkan pada sebuah keping logam emas yang sangat tipis. Partikel alfa adalah partikel yang dipancarkan oleh unsur radioaktif bermuatan listrik positif yang besarnya dua kali muatan elektron dan massanya empat kali massa proton.



Rutherford memiliki asumsi bahwa jika teori atom Thomson benar maka seluruh partikel alfa dengan energi yang besar harus menembus lurus keping tipis emas tersebut.



Gambar 6.2

Percobaan hamburan partikel alfa yang dilakukan oleh Rutherford.

Gambar 6.3

Model atom Rutherford. Partikel alfa yang mendekati nukleus yang masih akan terkena gaya yang besar sehingga dibelokkan dengan sudut yang besar.

Sebab, atom-atom keping logam emas netral tidak menghalangi partikel alfa yang bermuatan listrik positif. Sebagian besar partikel alfa menembus keping logam tipis lurus mengenai layar. Akan tetapi, beberapa partikel alfa yang lainnya dibelokkan bahkan ada yang dipantulkan. Setiap sudut pembelokkan dan pemantulan sinar alfa tersebut diukur oleh Rutherford.

Fakta ini kemudian dianalisis oleh Rutherford sebagai berikut.

Berdasarkan Hukum Coulomb, partikel alfa yang bermuatan positif hanya akan dibelokkan atau dipantulkan oleh suatu muatan sejenis yakni muatan positif. Berarti, dalam atom logam emas harus ada muatan listrik positif dan tidak tersebar di seluruh atom melainkan terpusat pada suatu tempat sehingga menolak partikel alfa.

Atas dasar fakta ini, Rutherford kemudian berkesimpulan sebagai berikut.

- a. Muatan listrik atom dan sebagian besar massa atom terpusat pada suatu titik yang disebut oleh Rutherford sebagai inti atom. Inti atom ini merupakan suatu daerah yang sangat kecil dengan diameter sekitar 10^{-14} m.
- b. Pada jarak yang relatif jauh dari inti atom tersebut, partikel bermuatan negatif atau elektron beredar mengelilingi inti. Muatan listrik positif yang berpusat di inti atom, nilai sama besar dengan jumlah muatan listrik negatif dari elektron-elektron yang mengelilinginya.

Meskipun lebih baik daripada teori J.J. Thomson, namun teori atom Rutherford masih menyimpan kelemahan. Kelemahan teori atom Rutherford adalah sebagai berikut.

- a. Teori atom Rutherford tidak dapat menjelaskan spektrum cahaya yang dipancarkan oleh atom hidrogen ketika gas hidrogen tersebut dipanaskan atau dimasukkan ke dalam tabung dan diberi beda potensial listrik serah yang tinggi antara ujung-ujung tabung tersebut.
- b. Teori atom Rutherford tidak dapat menjelaskan kestabilan atom. Berdasarkan hukum Coulomb, elektron yang berinteraksi dengan inti atom akan mengalami gaya Coulomb yang juga berfungsi sebagai

gaya sentripetal. Akibatnya, elektron mengalami percepatan (percepatan sentripetal). Menurut teori gelombang elektromagnetik yang dikemukakan oleh Maxwell jika muatan (elektron) mengalami percepatan maka muatan tersebut akan memancarkan gelombang elektromagnetik. Jika demikian maka energi elektron berkurang dan akhirnya akan jatuh ke inti atom, tetapi pada kenyataannya tidak demikian.

4. Model Atom Niles Bohr

Setelah Rutherford mengemukakan bahwa massa dan muatan positif atom terhimpun pada suatu daerah kecil di pusat atom, ahli fisika asal Denmark, **Niles Bohr**, pada 1913 mengemukakan bahwa struktur atom mirip seperti sistem tata surya. Inti atom berada di pusat sistem atom dan elektron berada pada lintasan tertentu yang disebut kulit atom. Untuk menguatkan teori atom yang diusulkannya, Bohr menyusun dua postulat (dalil) tentang atom. Postulat ini di kalangan para ilmuwan pada saat itu dipandang radikal.

Berikut ini adalah kedua postulat yang dikemukakan Bohr.

Postulat Pertama

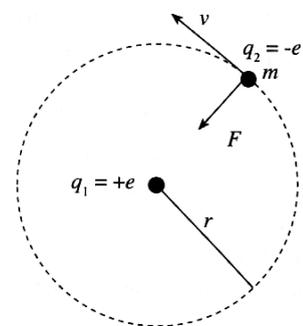
Berlawanan dengan teori elektromagnetik klasik, dalam suatu sistem atom, elektron tidak memancarkan radiasi ketika ia mengorbit inti atom. Lintasan-lintasan elektron mengorbit inti atom. Lintasan-lintasan elektron mengorbit tanpa memancarkan radiasi dinamakan lintasan stasioner atau orbit stasioner.

Postulat Kedua

Pemancaran dan penyerapan gelombang elektromagnetik dalam suatu atom berhubungan dengan transisi elektron dari dua lintasan stasioner.

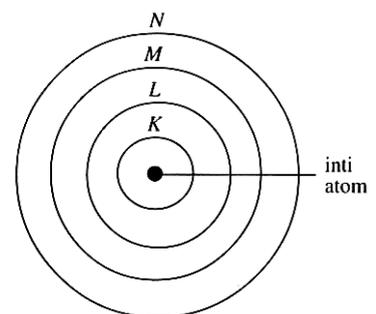
Model atom hidrogen memperlihatkan bahwa sebuah elektron mengitari sebuah inti atom bermuatan positif. Jari-jari orbit lingkarannya r dan elektron bermassa m bergerak dengan laju linear tetap v . Gaya tarik Coulomb berperan memberikan percepatan sentripetal sehingga

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z \cdot e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$



Gambar 6.4

(Model atom Bohr untuk atom hidrogen.)



Gambar 6.5

Model atom Bohr memiliki lintasan elektron yang diberi nama dengan abjad K, L, M, dan seterusnya. Jari-jari lintasan elektron harus sesuai dengan postulat Bohr.

Oleh karena untuk hidrogen $Z = 1$ maka persamaan di atas menjadi

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

Energi kinetik elektron adalah

$$Ek = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

Sedangkan energi potensial elektron adalah energi potensial Coulomb yang besarnya sebagai berikut.

$$Ep = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

Sehingga energi total yang dimiliki oleh elektron adalah

$$E = Ek + Ep$$

$$E = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

$$E = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

Eksperimen 6.1

Eksperimen teori-teori atom

Alat dan Bahan:

- majalah
- koran
- buku

Langkah-Langkah Eksperimen:

Coba Anda buat makalah mengenai penemuan teori-teori atom yang dikembangkan sejak abad 18 hingga saat ini. Cari informasi tersebut di majalah, koran, internet, atau buku-buku referensi lainnya. Apa yang dapat Anda peroleh dari penemuan-penemuan teori atom tersebut hingga saat ini. Tentu saja, cukup berkembang bukan?

Kemudian, diskusikan dengan teman-teman Anda di kelas dibantu oleh guru sebagai pembimbing.

Uji Kemampuan 6.1

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Jelaskan secara singkat perkembangan teori atom sejak masa Demokritus hingga munculnya teori atom Bohr.
2. Pada eksperimen Thomson, disimpulkan bahwa partikel sinar katode merupakan partikel bermuatan dengan massa lebih kecil daripada atom. Apakah yang mendasari kesimpulan tersebut. Jelaskan.
3. Jelaskan perbedaan antara hasil eksperimen Rutherford dan hipotesis dari teori atom Thomson.
4. Bagaimana hubungan antara spektrum hidrogen dan perpindahan elektron? Jelaskan serta tuliskan persamaan umumnya.

5. Jari-Jari Lintasan Stasioner

Fisika klasik meramalkan bahwa sebuah muatan elektrik yang mengalami percepatan, seperti elektron yang mengorbit dalam model ini, harus meradiasikan energi elektromagnetik secara kontinu. Ketika energi ini dipancarkan, energi total elektron menurun dan elektron akan bergerak spiral menuju inti atom sehingga atom akhirnya jatuh ke inti atom. Untuk mengatasi kesulitan ini, Bohr mengusulkan gagasan orbit stasioner. Dari sini Bohr menyimpulkan bahwa dalam keadaan ini momentum sudut orbital elektron

bernilai kelipatan dari harga $\frac{h}{2\pi}$ atau ditulis \bar{h} dengan

$$\bar{h} = \frac{h}{2\pi}$$

Vektor momentum sudut dalam fisika klasik didefinisikan sebagai $L = r \times p$. Untuk momentum sudut elektron yang beredar mengelilingi inti atom, r tegak lurus p sehingga kita dapat menyederhanakannya menjadi $L = r \cdot p = m \cdot v \cdot r$. Jadi menurut postulat sudut adalah

$$m \cdot v \cdot r = n \cdot \bar{h}$$

dengan $n =$ bilangan bulat ($n = 1, 2, 3, \dots$)

Dengan memasukkan harga v pada persamaan $m \cdot v \cdot r = n \cdot \bar{h}$

ke dalam persamaan $Ek = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$. Maka, akan diperoleh

$$Ek = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

$$\frac{1}{2}m \left(\frac{n\hbar}{mr} \right)^2 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

$$\frac{1}{2} \frac{n^2 \hbar^2}{mr^2} = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$$

$$r = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2} n^2 = a_0 n^2$$

dengan $a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2}$

Maka diperoleh nilai deret jari-jari r yang diperkenankan. Berdasarkan a_0 didefinisikan sebagai jari-jari Bohr. Untuk atom hidrogen Bohr kemudian mendapatkan harga $a_0 = 0,0529$ nm atau 0,529 angstrom. Berdasarkan teori atom Bohr ini jari-jari orbit elektron hanya dapat bernilai $a_0, 4a_1, 9a_0, 16a_0, 25a_0$, dan seterusnya. Jari-jari atom, menurut teori ini tidak pernah bernilai $3a_0$ atau $4,5a_0$.

6. Energi Elektron Berdasarkan Teori Bohr

Besar energi elektron $E = \frac{1}{2}mv^2$ dapat diperoleh dengan meng-

gabungkan persamaan $r = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{me^2} n^2 = a_0 n^2$ dan persaa-

man $E = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$. Maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$E_n = \frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_0^2\hbar} \frac{1}{n^2}$$

Persamaan ini menyatakan bahwa energi elektron terkuantisasi. Artinya, hanya nilai-nilai energi tertentu yang diperkenankan. Jika dari persamaan di atas semua nilai tetap dihitung. Maka, akan diperoleh persamaan yang sederhana sebagai berikut.

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} eV$$

Pada tingkat terendah, nilai $n = 1$, energi elektron sebesar $-13,6$ eV dan beredar pada jari-jari Bohr $0,529$ angstrom. Tingkat energi elektron pada keadaan yang lebih tinggi digambarkan oleh skema berikut.

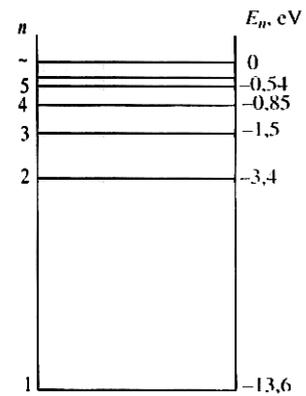
Jika elektron dan inti atom terpisah sangat jauh, yaitu untuk $n = \infty$ maka diperoleh $E = 0$. Kemudian, elektron itu bertransisi atau berpindah dari lintasan luar ke lintasan dalam sehingga ia berada pada orbit tertentu dalam lintasan n tertentu. Pada keadaan ini elektron memiliki harga energi lebih kecil daripada keadaan semula ($E = 0$) maka akan dipancarkan energi sebesar En . Sebaliknya, jika elektron pada keadaan n maka elektronnya dapat kita bebaskan dari ikatan inti dengan memberinya energi sebesar E_0 .

Energi ini dikenal dengan energi ikat keadaan n . Jika energi yang dibebaskan melebihi energi ikat maka kelebihan energi tersebut dapat muncul sebagai energi kinetik elektron yang kini telah bebas dan tidak terikat lagi pada inti atom.

Bohr mempostulatkan bahwa meskipun elektron tidak memancarkan radiasi elektromagnetik ketika beredar pada suatu tingkat tertentu. Namun, elektron dapat berpindah dari suatu keadaan energi tertentu ke keadaan energi yang lain. Selisih energi antara dua keadaan tersebut muncul sebagai sebuah radiasi gelombang elektromagnetik berenergi hf . Artinya, jika elektron berpindah dari keadaan awal ke keadaan akhir maka akan terjadi pancaran atau penyerapan radiasi elektromagnetik.

Frekuensi gelombang elektromagnetik yang diserap atau dipancarkan dari keadaan stasioner adalah

$$hf = |E_i - E_r|$$



Gambar 6.6

Tingkat-tingkat Energi

dengan:

E_i = energi mula-mula

E_f = energi akhir

f = frekuensi radiasi gelombang elektromagnetik

h = konstanta Planck ($h = 6,6260755 \times 10^{-34}$ joule.sekon)

B. Atom Berelektron Banyak

Teori Bohr dapat dengan tepat menjelaskan spektrum cahaya yang dipancarkan oleh atom hidrogen dari tingkat-tingkat energi elektronnya. Untuk atom hidrogen yang memiliki $Z = 1$ berlaku

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} eV$$

Dengan metode yang sama, energi yang dimiliki oleh suatu elektron dari suatu atom yang memiliki nomor atom $Z > 1$ dapat dituliskan sebagai berikut.

$$E_n = -\frac{13,6z^2}{n^2} eV$$

Anda dapat menyimpulkan bahwa elektron-elektron pada lintasan yang berbeda memiliki energi yang berbeda pula. Namun, ini tidak cukup apabila digunakan untuk membedakan elektron-elektron yang berada di lintasan yang sama dalam satuan atom. Bagaimana cara untuk membedakan elektron-elektron dalam suatu atom berelektron banyak?

Untuk membedakan keadaan elektron-elektron dalam suatu atom digunakan bilangan kuantum, yaitu pembahasannya secara terinci sebagai berikut.

1. Bilangan Kuantum

Elektron mengelilingi inti atom menurut lintasan tertentu. Selain kedudukannya dalam lintasan, elektron juga memiliki keadaan-keadaan yang lain. Untuk menyatakan keadaan dan energi elektron digunakan bilangan kuantum. Ada empat macam bilangan kuantum yang dapat

menggambarkan keadaan elektron, yaitu sebagai berikut:

- Bilangan kuantum utama (n);
- Bilangan kuantum azimut (l);
- Bilangan kuantum magnetik (m_l);
- Bilangan kuantum spin (m_s).

Bilangan kuantum utama menyatakan nama kulit atom. Energi terendah dimulai dari kulit yang diberi nama kulit K , sedangkan energi yang lebih tinggi dengan nama kulit L , M , N , dan seterusnya.

Bilangan kuantum azimut menyatakan nama subkulit. Subkulit yang dikenal adalah sebagai berikut.

- Orbital s (*sharp*).
- Orbital p (*principle*).
- Orbital d (*diffuse*).
- Orbital f (*fundamental*).

Ada kemungkinan untuk orbital yang lebih tinggi lagi dinyatakan dengan orbital g , h , i , dan seterusnya.

Bilangan kuantum magnetik menyatakan banyaknya orbital yang terdapat di setiap subkulit, misalnya di subkulit energi p ada tiga orbital p_x , p_y , dan p_z . Bilangan kuantum spin menyatakan arah putaran elektron pada sumbunya.

a. Bilangan Kuantum Utama (n)

Untuk menyatakan orbit elektron di kulit tertentu digunakan notasi K untuk energi paling rendah. Kemudian, L , M , N , dan seterusnya untuk energi yang lebih tinggi. Setiap kulit hanya dapat diisi oleh sejumlah elektron tertentu. Bagaimana Anda mengetahui bahwa kulit K terdiri atas dua elektron, kulit L maksimal delapan elektron dan berapa elektron maksimal yang dapat mengisi kulit M ?

Untuk mengetahui hal ini, mari kita pelajari pembahasan mengenai bilangan kuantum utama (n) berikut.

Bilangan kuantum utama n merupakan bilangan yang bernilai bulat, $n = 1, 2, 3, \dots$

Setiap nilai n menyatakan nama kulit tertentu dari atom. Nilai $n = 1$ menyatakan kulit K , $n = 2$ menyatakan kulit L , $n = 3$ menyatakan kulit M , $n = 4$ menyatakan kulit N , dan seterusnya.

Banyaknya elektron maksimal yang dapat mengisi setiap kulit dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut.

$$2n^2; \text{ dengan } n = 1, 2, 3, \dots$$

Misalnya, untuk kulit L , $n = 2$. Jumlah maksimal elektron yang mengisi kulit L adalah $2 \times 2^2 = 8$ elektron. Cara yang sama dapat dicari jumlah maksimal elektron pada kulit-kulit yang lain.

Menurut teori Bohr besarnya momentum sudut elektron sama dengan tetapan Planck dikalikan bilangan bulat atau secara matematis dapat ditulis persamaannya sebagai berikut.

$$L = n \frac{h}{2\pi} \quad \text{atau} \quad mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

Keterangan:

r = jari-jari orbit elektron (m)

v = kecepatan orbit elektron

n = bilangan bulat

h = tetapan Planck (Js)

m = massa elektron (kg)

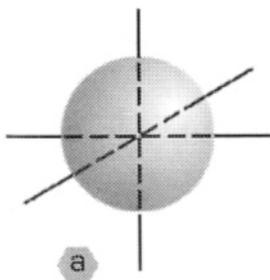
Nilai n sesuai dengan nama kulitnya.

Contoh Soal 6.1

Atom Na memiliki 11 elektron. Tentukan jumlah kulit dan jumlah elektron yang terdapat dalam setiap kulit!

Jawab:

Berdasarkan konfigurasi elektron, kulit K memiliki 2 elektron, kulit L memiliki 8 elektron, dan 1 elektron menempati kulit M. Jadi, ada tiga kulit untuk atom natrium.



b. Bilangan Kuantum Orbital

Bilangan kuantum orbital yang disebut juga bilangan kuantum azimut menggambarkan bentuk orbital elektron. Nilai l bergantung pada nilai bilangan kuantum utama n yaitu:

$$l \text{ bernilai } 0, 1, 2, \dots, n-1$$

Masing-masing kulit atom memiliki subkulit yang ditunjukkan oleh adanya bilangan kuantum orbital ini.

Masing-masing orbital l itu memiliki nama dan bentuk tertentu. Nama orbital yang dinyatakan oleh nilai l adalah: $l = 0$ dinamakan subkulit s

$l = 1$ dinamakan subkulit p

$l = 2$ dinamakan subkulit d

$l = 3$ dinamakan subkulit f

Bilangan kuantum orbital dikenal juga dengan nama bilangan kuantum momentum sudut. Jika diketahui bilangan kuantum orbital l maka momentum sudut elektron dapat dicari dengan menggunakan persamaan

$$L = \sqrt{l(l+1)} \frac{h}{2\pi}$$

$$l = 0, 1, 2, \dots, n-1$$

Contoh Soal 6.2

Tentukanlah orbital yang terdapat di kulit L dan besarnya momentum sudut elektron pada orbital tersebut!

Jawab:

Diketahui: Untuk kulit L $n = 2 \Rightarrow l = 0, \dots, (2-1) = 0, 1$

Tentukan sudutnya adalah

$$l = 0 \rightarrow L = \sqrt{0(0+1)} \frac{h}{2\pi} = \frac{h}{2\pi}$$

$$l = 1 \rightarrow L = \sqrt{1(1+1)} \frac{h}{2\pi} = \frac{\sqrt{2}h}{2\pi}$$

c. Bilangan Kuantum Magnetik

Nilai bilangan kuantum magnetik bergantung pada nilai bilangan kuantum orbital (l) yaitu:

$$m_l = -l, -(l-1), -(l-2), \dots, l-2, l-1, l$$

Jadi, m_l memiliki nilai dari $-l$ sampai l

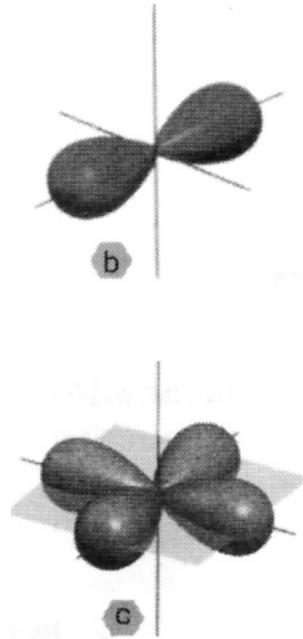
Sebagai contoh, untuk

$$l = 0 \Rightarrow m_l = 0$$

$$l = 1 \Rightarrow m_l = -1, 0, 1$$

$$l = 2 \Rightarrow m_l = -2, -1, 0, 1, 2$$

Pada penjelesan sebelumnya telah disebutkan bahwa bilangan kuantum orbital l menyatakan besarnya momentum sudut elektron. Bilangan kuantum magnetik menunjukkan arah vektor momentum sudut.



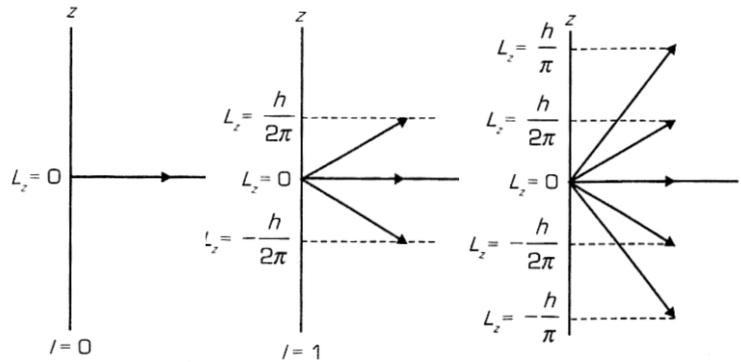
Gambar 6.7

- (a) orbital s merupakan sebuah bola;
- (b) orbital p mempunyai bentuk seperti balon yang terpinil dua;
- (c) orbital d mempunyai bentuk seperti empat balon yang terpinil.

Arah momentum sudut itu ditentukan dengan komponen vektor terhadap sumbu z , yaitu L_z . Nilai L_z ditentukan oleh nilai bilangan kuantum magnetik m_l .

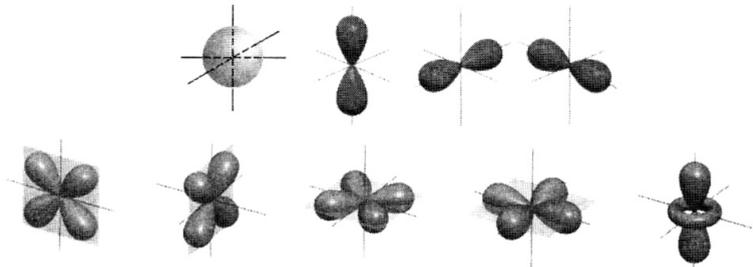
$$L_z = m_l \frac{h}{2\pi}$$

Gambar 6.8
 (a) orbital s hanya mempunyai 1 kemungkinan arah;
 (b) orbital p memiliki 3 kemungkinan; dan
 (c) orbital d memiliki 5 kemungkinan.



Bilangan kuantum magnetik juga menggambarkan kecenderungan kedudukan orbital dalam ruang.

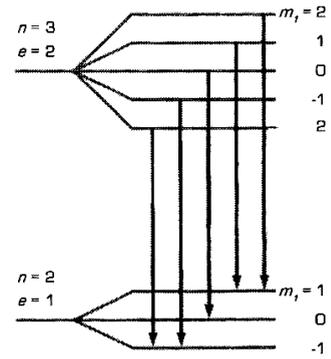
Gambar 6.9
 Bentuk dan kecenderungan arah orbital-orbital.



Tahukah Anda alasan mengapa bilangan kuantum m_l dinamakan sebagai bilangan kuantum magnetik? Dari hasil eksperimen ditemukan bahwa pada saat diletakkan dalam sebuah medan magnetik, spektrum garis atom terpisah menjadi garis-garis yang rapat. Terpecahnya garis spektrum menjadi garis-garis rapat oleh medan magnetik disebut efek Zeeman. Peristiwa ini pun menunjukkan bahwa tingkat energi atom pun menjadi terpisah-pisah. Berdasarkan hal tersebut, disimpulkan bahwa energi atomik tidak hanya bergantung pada bilangan kuantum sama n , tetapi juga bergantung pada bilangan kuantum lain yang dinamakan bilangan kuantum magnetik.

d. Efek Zeeman

Dalam medan magnetik, energi dalam keadaan atomik akan berubah menjadi beberapa subkeadaan jika atom itu berada dalam medan magnetik dan energinya dapat sedikit lebih besar atau lebih kecil daripada keadaan tanpa medan magnetik. Gejala ini menyebabkan terpecahnya garis spektrum individual menjadi garis-garis terpisah apabila atom dipancarkan ke dalam medan magnetik, dengan jarak antara garis bergantung dari besar medan tersebut. Terpecahnya garis spektral oleh medan magnetik disebut efek Zeeman. Nama ini diambil dari nama seorang ahli fisika berkebangsaan Belanda, Zeeman, yang mengamati efek ini pada 1896. Efek Zeeman merupakan bukti yang jelas dari kuantisasi ruang.



Gambar 6.10

Efek Zeeman sebuah spektrum terpecah menjadi tiga spektrum.

e. Bilangan Kuantum Spin

Di samping bergerak mengelilingi inti atom, elektron juga berputar pada sumbunya. Perputaran (spin) elektron dapat menimbulkan momen magnetik. Ada dua kemungkinan perputaran yang saling berlawanan arah. Salah satu diberi tanda dengan notasi penulisan anak panah ke atas, sedangkan arah yang lainnya diberi tanda dengan notasi penulisan anak panah ke bawah.

Subkulit *s* hanya memiliki sebuah orbital. Jadi, subkulit ini paling banyak hanya dapat memiliki dua elektron. Subkulit *p* memiliki tiga orbital yaitu $p_x, p_y,$ dan p_z masing-masing memiliki dua elektron yang arah spinnya ke atas dan ke bawah. Orbital *p* ini paling banyak memiliki 2, 3, 6 elektron.

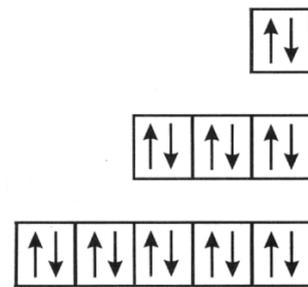
Elektron dalam subkulit *s, p,* dan *d* dapat digambarkan dengan diagram orbital.

Benda yang berputar memiliki momentum sudut. Vektor momentum sudut yang berkaitan dengan bilangan kuantum *s* ini adalah *S* yang panjangnya

$$S = \frac{3h}{8\pi}$$

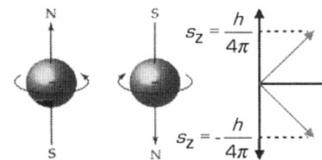
Arah momentum sudut ditentukan dengan komponen vektor itu pada sumbu *z*, yaitu sumbu tegak pada sistem koordinat tiga dimensi.

$$S_z = m_s \frac{h}{2\pi} ; \text{ dengan } m_s = \frac{1}{2} \text{ atau } \frac{1}{2}$$



Gambar 6.11

Elektron dalam subkulit *s, p,* dan *d*.



Gambar 6.12

Arah putaran spin dan vektor momentum sudut *s*.

Uji Kemampuan 6.2

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Tentukan besarnya momentum sudut elektron dari atom hidrogen untuk elektron yang menempati orbit M jika diketahui $h = 6,63 \times 10^{-34}$ Js.
2. Jelaskan apa yang Anda ketahui tentang:
 - a. bilangan kuantum utama;
 - b. bilangan kuantum orbital;
 - c. bilangan kuantum magnetik;
 - d. bilangan kuantum spin.
3. Untuk bilangan orbital $l = 3$, tentukanlah:
 - a. nilai momentum magnetik, m_p yang mungkin;
 - b. momentum sudut elektron dalam arah sumbu Z.
4. Tentukan pemisahan Zeeman normal dalam garis spectrum 4916 \AA dari gas raksa ketika ditempatkan dalam medan magnetik 0,3 T.
5. Sebuah garis spectrum dengan panjang gelombang 5000 \AA menunjukkan pemisahan Zeeman normal sebesar $1,1 \times 10^{-3} \text{ \AA}$. Tentukanlah besar medan magnetiknya.

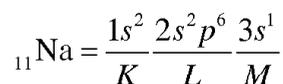
2. Sifat Atom

Salah satu kelemahan teori Bohr adalah keterbatasan untuk menjelaskan sifat-sifat atom. Sifat atom yang dapat diterangkan dengan menggunakan teori Bohr adalah mengenai tingkat energi elektron, misalnya tingkat energi berbagai spektrum.

Sifat-sifat suatu unsur dapat diketahui melalui struktur atomnya. Susunan elektron dalam suatu atom dapat dipakai sebagai dasar untuk mengetahui sifat-sifat atom tertentu. Pada sebagian unsur, kulit-kulit atom ada yang terisi elektron dengan penuh dan ada yang tidak penuh. Kulit yang tidak penuh terisi elektron berada pada kulit paling luar. Elektron pada kulit terluar ini dinamakan elektron valensi.

Pengisian elektron dimulai dari tingkat energi terendah. Konfigurasi yang matap terdapat pada subkulit yang terisi penuh. Jika subkulit telah terisi penuh, sisa elektron akan mengisi subkulit selanjutnya. Misalnya, ada satu elektron yang mengisi pada subkulit terluar maka elektron ini cenderung mudah lepas agar atom menjadi stabil. Pelepasan elektron ini dapat terjadi dengan cara berkaitan dengan atom lain.

Contohnya, mari kita lihat atom Na yang memiliki konfigurasi



Kulit M terdiri atas subkulit s , p , dan d . Dari konfigurasi atom Na tampak hanya ada satu elektron yang mengisi pada kulit M yaitu pada orbital s maka untuk menjadi stabil, atom Na cenderung melepaskan satu elektron terluarnya yang terdapat pada kulit M .

Sebaliknya jika pada subkulit terluar kekurangan satu elektron untuk menjadi stabil maka atom ini cenderung mudah menerima satu elektron dari luar.

Contohnya, atom ${}_{25}\text{Mn}$ pada kulit terluarnya yaitu kulit M terisi 15 elektron. Kulit M terisi maksimal 16 elektron, berarti masih kekurangan 1 elektron agar penuh maka atom Mn cenderung menerima satu elektron dari atom lain agar menjadi stabil.

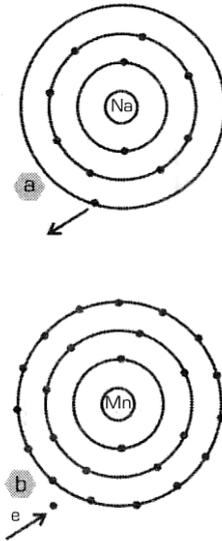
Atom Na dan Mn dapat bergabung menjadi molekul yang stabil karena pada masing-masing atom akan memiliki kulit atau subkulit yang terisi penuh oleh elektron. Dari contoh tersebut kita dapat menyimpulkan bahwa atom-atom cenderung untuk memiliki keadaan yang stabil dengan cara melepas atau menerima elektron.

Jari-Jari Atom

Menurut teori mekanika gelombang, elektron berada dalam suatu daerah yang disebut orbitak. Elektron mengelilingi inti dengan suatu rapat probabilitas tertentu. Penyebaran elektron juga dipengaruhi oleh atom-atom lain yang berdekatan.

Marilah kita perhatikan unsur pada periode ketiga dalam daftar berkala. Meskipun unsur-unsur periode ketiga sama-sama memiliki tiga buah kulit elektron, tetapi dari kiri ke kanan jari-jari atom akan semakin kecil. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya jumlah proton dan jumlah elektron sehingga tarik-menarik antara inti atom dan elektron-elektron akan semakin kuat. Akibatnya, elektron-elektron lebih dekat ke arah inti. Berarti jari-jari atom akan semakin kecil.

Dalam satu golongan dari atas ke bawah maka semakin banyak jumlah elektron semakin banyak pula jumlah kulitnya. Misalnya, periode pertama memiliki satu kulit yaitu kulit K . Kemudian, periode ketiga memiliki dua kulit yaitu kulit K dan L . Semakin banyak jumlah kulit berarti semakin besar jari-jari atomnya.



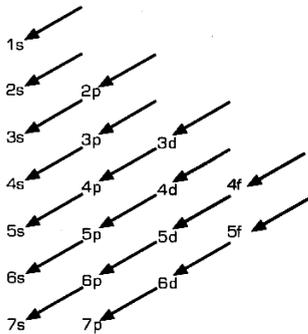
Gambar 6.13

- (a) Elektron valensi pada atom Na dilepaskan dan diberikan ke atom Mn.
- (b) Atom Mn menerima elektron atom Na.

3. Sistem Periodik

Sistem periodik unsur-unsur disusun berdasarkan kenaikan nomor atomnya atau berdasarkan urutan jumlah elektron. Ternyata, sistem periodik ini dapat menjelaskan sifat-sifat unsur pada periode dan golongan tertentu dan menjelaskan mengapa unsur-unsur dalam satu periode memiliki sifat-sifat yang berbeda antara golongan yang satu dan golongan yang lainnya.

Prinsip Pauli, aturan Aufbau, dan kaidah Hund sangat membantu untuk memahami keteraturan susunan elektron atau subkulit dalam daftar berkala. Konfigurasi elektron adalah cara penyusunan atau pengaturan elektron dalam suatu atom. Dalam pembahasan ini, kita mencoba membuat konfigurasi elektron per subkulit. Dengan konfigurasi elektron tersebut dapat diketahui bilangan kuantum yang berkaitan dan sifat-sifatnya dapat diketahui dari jumlah elektron terluar. Aturan penulisan konfigurasi elektron berdasarkan berikut ini.



Gambar 6.14

Diagram konfigurasi pengisian subkulit.

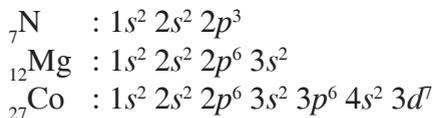
a. Aturan Aufbau

Penempatan elektron dimulai dari subkulit yang memiliki tingkat energi yang paling rendah sampai penuh. Setelah itu, dilanjutkan dengan subkulit yang tingkat energinya lebih tinggi dan seterusnya sesuai dengan jumlah elektron yang ada.

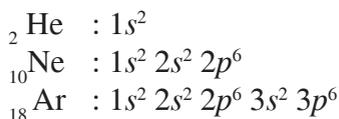
Perhatikan hubungan bilangan kuantum utama (n) dengan bilangan kuantum azimut (l) yaitu sebagai berikut.

Urutan tingkat energi sesuai dengan urutan arah panah $1s$, $2s$, $2p$, $3s$, $3p$, $4s$, $3d$, $5s$, $4d$, $5p$, $6s$.

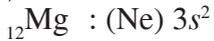
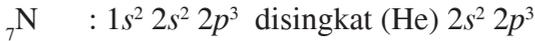
Perhatikan cara penulisan konfigurasi elektron berikut:



Cara penulisan ini terlalu panjang sehingga dilakukan penyingkatan berdasarkan konfigurasi gas mulia, yaitu:



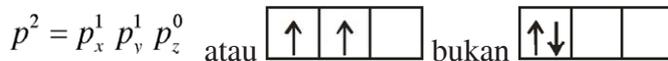
Dengan demikian konfigurasi elektron di atas disingkat sebagai berikut.



b. Kaidah Hund

Penempatan elektron pada orbital-orbital p , d , f yang memiliki tingkat energi yang sama (pada subkulit yang sama), masing-masing diisi dengan satu elektron terlebih dahulu dengan arah spin yang sama, kemudian diisi dengan elektron berikutnya dengan arah yang berlawanan.

Contoh



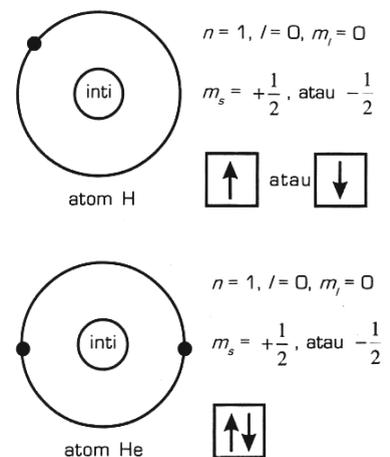
c. Asas Larangan Pauli

Pada 1925 Wolfgang Pauli mengemukakan aturan pengisian elektron pada atom yaitu elektron-elektron cenderung akan menempati energi terendah yang masih mungkin dalam suatu orbital. Oleh karena jumlah elektron maksimum yang dapat mengisi subkulit tertentu terbatas maka Pauli mengemukakan aturan yang dikenal dengan eksklusi asas larangan Pauli, antara lain sebagai berikut.

Dalam sebuah atom tidak boleh ada dua elektron yang menempati keadaan yang sama artinya tidak boleh memiliki keempat bilangan kuantum yang sama (n , l , m_l , dan m_s).

Asas ini sangat penting untuk memahami struktur atom apalagi untuk mengkaji sifat-sifat atom berelektron banyak.

Coba mari kita lihat pengisian elektron pada atom hidrogen yang memiliki satu elektron dengan konfigurasi $1s^1$. Elektron akan menempati tingkat energi terendah yaitu $n=1$ yang artinya berada pada kulit K . Bilangan kuantum azimutnya berharga $l=0$. Bilangan kuantum $l=0$ adalah orbitas s . Harga m_l dari $-l$ sampai l , karena $l=0$ maka m_l hanya bernilai nol juga. Elektron memiliki dua kemungkinan arah putaran yang menyebabkan arah momen magnet



Gambar 6.15

Bilangan kuantum atom H dan He yang berada dalam bilangan kuantum spin.

ke atas atau ke bawah. Gaya interaksi yang ada adalah gaya tarik antara elektron dan inti atom.

Kemudian, jika kita perhatikan pengisian elektron pada atom helium, terdapat dua elektron pada atom ini yang memiliki konfigurasi $2s^2$, yaitu satu elektron terisi seperti pada pengisian elektron pada atom hidrogen sedangkan satu elektron lagi memiliki ketiga bilangan kuantum sama dengan elektron yang pertama. Hal yang membedakan antara elektron pertama dan elektron kedua adalah bilangan kuantum spin, salah satu memiliki spin $+\frac{1}{2}$ dan yang lain memiliki spin $-\frac{1}{2}$. Antar elektron yang satu dan elektron yang lain timbul gaya tolak-menolak.

Unsur-unsur golongan alkali dan alkali tanah keduanya termasuk golongan *s* karena dalam konfigurasi elektron diakhiri dengan subkulit *s*. Jari-jari atom yang dimiliki relatif besar dibandingkan dengan unsur-unsur di sebelah kanannya. Dengan adanya elektron terluar ini memberi sifat konduktor listrik yang baik. Kereaktifannya cukup tinggi untuk bereaksi dengan unsur lain terutama dengan unsur golongan halogen karena yang satu mudah melepas elektron dan yang lain memiliki kecenderungan besar untuk menerima elektron.

Unsur-unsur golongan *p* yang baik tidak terisi penuh oleh elektron dalam konfigurasi terlihat kekurangan elektron untuk memiliki konfigurasi seperti gas mulia. Apabila Anda coba perhatikan golongan halogen, unsur-unsur ini cenderung mudah menangkap elektron untuk membentuk senyawa. Dapat dikatakan unsur-unsur tersebut memiliki kereaktifan yang tinggi dibandingkan dengan unsur golongan *p* lainnya.

Golongan gas mulia memiliki konfigurasi elektron yang sudah penuh pada kulit terluarnya, kecenderungan menangkap atau menerima elektron sangat kecil. Hal ini menyebabkan pada umumnya unsur gas mulia tidak membentuk senyawa dengan unsur lain.

4. Energi Ionisasi dan Elektron Valensi

Dalam pembentukan senyawa atom akan menerima dan melepaskan elektronnya. Pelepasan dan penerimaan elektron

b. Afinitas Elektron

Afinitas elektron adalah energi yang terlibat dalam peristiwa apabila suatu atom menerima elektron dari luar. Atom-atom yang memiliki gaya tarik-menarik antarintinya kecil menunjukkan bahwa afinitas elektronnya juga kecil. Hal-hal yang mempengaruhi besar kecilnya afinitas elektron, yaitu jumlah muatan dalam inti, jumlah antarinti, dan jumlah elektron dalam atom.

Besarnya afinitas elektron suatu atom tidak sama dengan energi ionisasi karena kedua hal itu bukan proses kebalikan.

Dalam satu golongan dari atas ke bawah harganya semakin kecil dan dalam satu periode dari kiri ke kanan semakin besar. Atom-atom yang semakin mudah menangkap elektron akan memiliki harga afinitas elektron yang makin besar.

Misalnya:

- Atom Na memiliki afinitas elektron lebih besar daripada atom Rb.
- Atom Na memiliki afinitas elektron lebih kecil dibandingkan atom Mg.

c. Elektron Valensi

Elektron yang berperan dalam menentukan sifat-sifat fisika dan kimia adalah elektron yang berada pada kulit paling luar. Elektron ini biasanya disebut sebagai elektron valensi yang sangat berperan dalam menentukan pembentukan senyawa. Adapun untuk kulit yang penuh, elektronnya tidak turut serta dalam menentukan sifat-sifat tersebut.

Dari daftar berkala terlihat dalam satu golongan atom-atom tersebut memiliki elektron valensi yang sama. Misalnya, atom Li yang memiliki $n = 2$ yang berarti terdapat kulit K dan kulit L . Untuk kulit K memiliki $l = 0$, $m_l = 0$ dan orbitas s . Pada $n = 2$, $l = 0$ dan 1 , $l = 0$ nilai $m_l = 0$ orbital yang bersesuaian adalah s dan untuk $l = 1$ harga $m_l = -1, 0, +1$ orbital yang bersesuaian adalah orbital p yang terdiri dari orbital p_x, p_y , dan p_z . Akan tetapi, karena jumlah elektron pada atom Li hanya tiga maka dua elektron mengisi kulit kulit K dan satu elektron lagi mengisi orbital $2s$ pada kulit L yang memiliki spin $+\frac{1}{2}$ atau $-\frac{1}{2}$.

Kita perhatikan unsur Na yang memiliki 11 elektron. Dari konfigurasi elektronnya diperoleh $n = 3$ yang menandai adanya kulit $K, L,$ dan M . Dua elektron menempati kulit $K,$ 8 elektron menempati kulit $L,$ dan 1 elektron menempati kulit terluar yaitu kulit M . Elektron di kulit M berada pada

orbital s memiliki spin $+\frac{1}{2}$ atau spin $-\frac{1}{2}$.

Agar lebih memahami lagi perhatikan uraian berikut.

${}^3\text{Li}$ $1s^2 2s^1$
 $n = 2$ terdiri dari:

kulit K
 $l = 0$
 $m_l = 0$
 orbital s



$1s^2$

kulit L
 $l = 0$
 $m_l = 0$
 orbital s



$2s^2$

$l = 1$
 $m_l = -1, 0, 1$
 orbital p



${}^{11}\text{Na}$
 $n = 3$ terdiri:

$1s^2 2s^2 2d^6 3s^1$

kulit K
 $l = 0$
 $m_l = 0$
 orbital s



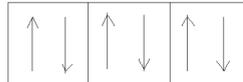
$1s^2$

kulit L
 $l = 0$
 $m_l = 0$
 orbital s



$2s^2$

$l = 1$
 $m_l = -1, 0, 1$
 orbital p



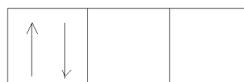
$2p^6$

kulit M
 $l = 0$
 $m_l = 0$
 2
 orbital s



$3s^1$

$l = 1$
 $m_l = -1, 0, 1$
 orbital p



$l = 3$
 $m_l = -2, -1, 0, 1,$
 orbital p



Uji Kemampuan 6.3

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

- Sebuah elektron mengalami transisi dari $n = 3$ deret Balmer spektrum atom hidrogen. Cepat rambat cahaya $c = 3 \times 10^8$ m/s, konstanta Rydberg $R = 1,097 \times 10^7$ m⁻¹ dan konstanta Planck $h = 6,62 \times 10^{-34}$ Js. Tentukan:
 - panjang gelombang;
 - frekuensi;
 - energi foton yang dipancarkan pada transisi tersebut.
- Elektron pindah dari lintasan $n = 4$ ke lintasan $n = 2$. Berapa persentase perubahan energi kinetik elektron?
- Elektron berpindah lintasan dari $n_A = 1$ ke $n_B = 3$ karena ada sejumlah energi yang diterima, kemudian elektron secara spontan pindah ke keadaan dasar. Tentukanlah:
 - energi;
 - frekuensi;
 - panjang gelombang foton yang dipancarkan pada saat perpindahan spontan.
- Hitung energi ionisasi atom yang berada pada tingkat energi ketiga. Hitung juga potensial ionisasinya.

Ringkasan

Menurut Thomson, Atom terdiri atas bahan bermuatan positif dan elektron yang bermuatan negatif yang tersebar merata dalam muatan positif tersebut.

Model atom menurut Rutherford; atom terdiri atas inti atom yang bermuatan positif dan elektron yang bermuatan negatif dan bergerak mengelilingi inti, bagaikan planet-planet mengelilingi matahari pada tata surya

Kelemahan teori atom Rutherford sebagai berikut :

- Elektron mengelilingi inti sambil memancarkan gelombang elektromagnetik sehingga lintasannya selalu mengecil dan elektron dapat jatuh ke dalam inti.
- Tidak dapat menjelaskan terjadinya spektrum garis yang dipancarkan oleh atom hidrogen.

Model atom Bohr merupakan penyempurnaan dari model atom Rutherford. Menurut Bohr, Atom terdiri atas inti dan elektron-elektron bergerak mengitari inti dalam orbit-orbit yang bersifat dikrit dan stasioner. Berikut ini adalah teori atom Bohr.

- Elektron-elektron bergerak mengelilingi inti pada lintasan tertentu yang disebut kulit atau

tingkat energi. pada lintasan ini, elektron tidak memancarkan energi.

- Elektron dapat berpindah dari lintasan yang satu ke lintasan yang lainnya. Jika elektron berpindah ke lintasan yang lebih luar, elektron menyerap energi. Sebaliknya, jika elektron berpindah ke lintasan lebih dalam, elektron melepaskan energi.

Berikut ini adalah kelemahan teori atom Bohr:

- Teori atom Bohr tidak dapat menjelaskan tentang struktur halus.
- Untuk atom berelektron banyak, teori atom Bohr tidak cocok lagi sebab Bohr mengabaikan gaya tolak-menolak antar elektron yang satu dan elektron yang lain.
- Perbedaan sifat-sifat antara unsur yang satu dan unsur yang lain tidak cukup diterangkan dengan teori atom Bohr.
- Model atom Bohr melanggar prinsip ketidakpastian yang dikemukakan oleh Heisenberg.

Jari-jari lintasan stasioner diberikan oleh persamaan berikut.

$$r_n = n^2 r_1$$

Tingkat Energi elektron diberikan oleh persamaan.

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} = \frac{-13,6}{n^2} \text{eV}$$

Menurut teori Bohr, besarnya momentum sudut elektron adalah tetapan Planck dikalikan bilangan bulat. Secara matematis ditulis sebagai berikut.

$$L = n \frac{h}{2\pi}$$

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

Panjang gelombang yang dipancarkan oleh elektron jika terjadi transisi dari lintasan luar (n_B) kelintasan lebih dalam (n_A).

deret Lyman $n_A = 1$ dan $n_B = 2,3,4,-$

deret Balmer $n_A = 2$ dan $n_B = 3,4,5,-$

deret Paschen $n_A = 3$ dan $n_B = 4,5,6,-$

deret Bracket $n_A = 4$ dan $n_B = 5,6,7,-$

deret Pfund $n_A = 5$ dan $n_B = 6,7,8,-$

Ada 4 macam bilangan kuantum yang dapat menggambarkan keadaan elektron, yaitu sebagai berikut.

- a. Bilangan kuantum utama (n)
- b. Bilangan kuantum azimut (l)
- c. Bilangan kuantum magnetik (m_l)
- d. Bilangan kuantum spin (m_s).

Bilangan kuantum orbital disebut juga bilangan kuantum momentum sudut. Jika bilangan kuantum orbital l , momentum sudut elektron dapat dicari dengan persamaan berikut.

$$L = \sqrt{l(l+1)} \frac{h}{2\pi}$$

$$l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$$

Azas larangan Pauli, menyatakan bahwa dalam sebuah atom, tidak boleh ada dua elektron yang menempati keadaan kuantum yang sama, artinya elektron tidak boleh mempunyai bilangan kuantum sama.

Hal-hal yang mempengaruhi besar kecilnya afinitas elektron, yaitu sebagai berikut:

- a. jumlah muatan dalam inti
- b. jarak antarinti, dan
- c. jumlah elektron dalam atom.

Uji Kompetensi Bab 6

A. Pilihlah satu jawaban yang benar

- Perbandingan antara muatan dengan massa electron adalah $1,7588 \times 10^{11}$ coulomb/kg. Hal ini diselidiki oleh seorang ahli fisika bernama
 - Thomson
 - Millikan
 - Rutherford
 - John Dalton
 - W.K. Roentgen
- Pada model atom Bohr untuk gas hydrogen, perbandingan periode electron yang mengelilingi inti pada orbit $n = 1$ dan pada orbit $n = 2$ adalah
 - 1 : 2
 - 2 : 1
 - 1 : 4
 - 1 : 8
 - 1 : 1
- Salah satu konsep atom menurut Dalton adalah
 - molekul terdiri dari atom-atom
 - massa keseluruhan atom berubah
 - atom tidak bergabung dengan atom lainnya
 - atom tidak dapat membentuk suatu molekul
 - atom dapat dipecah-pecah lagi
- Elektron dalam sebuah atom hydrogen berada pada tingkat eksitasi pertama. Ketika electron tersebut menerima tambahan energi 2,86 eV, electron tersebut akan berpindah ke orbit
 - $n = 2$
 - $n = 3$
 - $n = 3$
 - $n = 5$
 - $n = 6$
- Percobaan hamburan Rutherford menghasilkan kesimpulan
 - atom adalah bagian terkecil dari unsur
 - elektron adalah bagian atom yang bermuatan listrik negatif
 - atom memiliki massa yang tersebar secara merata
 - massa atom terpusat di suatu titik yang disebut inti
 - elektron mengelilingi inti pada lintasan tertentu
- Panjang gelombang foton yang dipancarkan pada perpindahan electron dari tingkat energi $E_2 = -3,4$ eV ke tingkat energi $E_1 = -13,6$ eV ($h = 6,63 \times 10^{-34}$ Js) adalah
 - $1,21 \times 10^{-9}$ m
 - $1,21 \times 10^{-8}$ m
 - $2,11 \times 10^{-8}$ m
 - $1,21 \times 10^{-7}$ m
 - $2,11 \times 10^{-7}$ m
- Salah satu model atom menurut Bohr adalah
 - elektron bergerak dengan lintasan stasioner
 - elektron merupakan bagian atom yang bermuatan negatif
 - tidak memiliki momentum angular
 - atom merupakan bola pejal bermuatan positif
 - atom tidak dapat dipecah-pecah lagi
- Panjang gelombang dari garis ke-2 deret Paschen adalah ($R = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$)
 - $1,28 \times 10^{-4}$ m
 - $1,28 \times 10^{-5}$ m
 - $1,28 \times 10^{-6}$ m
 - $1,28 \times 10^{-7}$ m
 - $1,28 \times 10^{-8}$ m
- Persamaan panjang menurut gelombang spektrum atom hydrogen menurut deret Lyman adalah
 - $$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 2, 3, 4, \dots$$
 - $$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 3, 4, 5, \dots$$

- c. $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 4, 5, 6, \dots$
- d. $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 5, 6, 7, \dots$
- e. $\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 6, 7, 8, \dots$
10. Berdasarkan model atom Bohr, tetapan Rydberg adalah $1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ dan cepat rambat gelombang elektromagnet di ruang hampa adalah $3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Jika terjadi transisi elektron dari lintasan $n = 4$ ke lintasan $n = 1$, dipancarkan foton dengan frekuensi
- $2,47 \times 10^{15} \text{ Hz}$
 - $3,08 \times 10^{15} \text{ Hz}$
 - $4,62 \times 10^{15} \text{ Hz}$
 - $4,94 \times 10^{15} \text{ Hz}$
 - $6,16 \times 10^{15} \text{ Hz}$
11. Jika energi elektron atom hidrogen pada tingkat dasar $-13,6 \text{ eV}$ maka energi yang diserap atom hidrogen agar elektronnya tereksitasi dari tingkat dasar ke lintasan kulit M adalah
- $6,82 \text{ eV}$
 - $8,53 \text{ eV}$
 - $9,07 \text{ eV}$
 - $10,20 \text{ eV}$
 - $12,09 \text{ eV}$
12. Konfigurasi suatu atom netral $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1$
Pernyataan yang tidak benar adalah
- mudah melepas suatu electron
 - termasuk unsur golongan 1A
 - termasuk unsur periode 4
 - merupakan unsur blok s
 - energi ionisasinya relative besar
13. Dalam model atom Bohr, energi yang diperlukan oleh elektron hidrogen untuk pindah dari orbit dengan bilangan kuantum 1 ke 3 adalah (energi dasar = $-13,6 \text{ eV}$)
- $1,50 \text{ eV}$
 - $1,90 \text{ eV}$
 - $2,35 \text{ eV}$
 - $12,10 \text{ eV}$
 - $13,60 \text{ eV}$
14. Berikut ini yang masih dapat diterangkan dengan teori atom Bohr adalah
- H_2
 - Li^+
 - He
 - Li^{2+}
 - Li
15. Jika elektron berpindah dari kulit M ke kulit K pada atom hidrogen dan R adalah konstanta Rydberg maka panjang gelombang yang terjadi besarnya
- $\frac{8}{9R}$
 - $\frac{9}{8R}$
 - $\frac{17}{9R}$
 - $\frac{9}{17R}$
 - $\frac{1}{R}$
16. Pernyataan berikut yang sesuai dengan aturan Pauli adalah
- tidak mungkin ada dua elektron dalam satu atom
 - tidak mungkin ada dua atom memiliki satu electron
 - ada sembilan elektron maksimum dapat mengisi kulit M
 - ada dua elektron orbital s
 - tidak mungkin ada dua elektron dalam orbital s atom H
17. Elektron atom hidrogen model Bohr mengelilingi intinya dengan bilangan kuantum $\frac{1}{n}$
Jika energi ionisasi atom itu bernilai $\frac{1}{16}$ kali energi ionisasi atom itu dalam keadaan dasarnya maka nilai n itu adalah
- 2
 - 4
 - 8
 - 16
 - 32

18. Untuk $l = 3$, besar momentum sudut totalnya adalah

- a. $\frac{h}{2\pi}\sqrt{3}$
 b. $\frac{h}{2\pi}\sqrt{6}$
 c. $\frac{h}{2\pi}\sqrt{7}$
 d. $\frac{h}{2\pi}\sqrt{10}$
 e. $\frac{h}{2\pi}\sqrt{12}$

19. Dalam model atom Bohr, elektron atom hidrogen yang mengorbit di sekitar inti atom membangkitkan kuat arus listrik rata-rata

sebesar 0,8 miliampere pada suatu titik di orbit lintasannya. Jika besar muatan elektron adalah $1,6 \times 10^{-19}$ coulomb maka jumlah putaran per detik elektron tadi mengelilingi inti adalah

- a. 5×10^{12}
 b. 5×10^{13}
 c. 5×10^{15}
 d. 5×10^{16}
 e. 5×10^{18}

20. Pada model atom Bohr, elektron atom hidrogen bergerak dengan orbit lingkaran dengan kelajuan $2,2 \times 10^6$ m/s. Besarnya arus pada orbit tersebut ($e = 1,6 \times 10^{-19}$ C)

- a. 1,06 pA
 b. 1,06 nA
 c. 1,06 A
 d. 1,06 mA
 e. 1,06 A

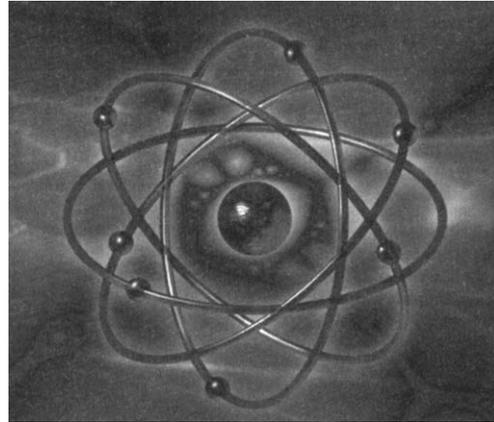
B. Soal Uraian

Jawablah pertanyaan-pertanyaan dibawah ini dengan benar.

- Tentukan panjang gelombang terpendek dan terpanjang atom hidrogen dari deret Lyman.
- Sebutkan kelemahan teori atom menurut:
 - Rutherford;
 - Bohr.
- Tentukan panjang gelombang foton yang dipancarkan ketika sebuah atom hidrogen mengalami transisi dari $n = 5$ ke $n = 2$.
- Bagaimana hubungan antara kuantisasi momentum sudut dan kuantisasi tingkat energi menurut teori atom Bohr?
- Tentukan energi ionisasi hidrogen jika panjang gelombang terpendek dalam deret Balmer adalah 3.650 \AA .
- Tuliskan konfigurasi elektron atom magnesium serta jelaskan alasan unsur tersebut tidak digolongkan sebagai golongan gas mulia.
- Gas mulia manakah yang mengisi penuh subkulit $6p$?
- Jelaskan hubungan jumlah elektron dan jari-jari atom.
- Unsur transisi apakah yang memiliki konfigurasi elektron $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^5$?
- Jelaskan pengertian-pengertian berikut.
 - spektrum;
 - energi ionisasi;
 - afinitas elektron;
 - elektron valensi.

Teori Kuantum Niels Bohr

Niels Bohr menerpakan teori kuantum terhadap model struktur atom Rutherford dengan mengasumsikan bahwa electron-elektron bergerak pada orbit stasioner tertentu akibat adanya momentum angular electron-elektron tersebut. Model ini memungkinkan para ilmuwan untuk menghitung tingkat energi yang mungkin untuk orbit-orbit ini dan menghasilkan sebuah postulat bahwa emisi cahaya terjadi ketika sebuah elektron berpindah ke orbit yang energinya lebih rendah.



Kasus

Untuk atom hydrogen pada orbit Bohr $n = 4$, jika diketahui $k = 9 \times 10^9$ dalam SI, $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C, massa electron $m = 1,9 \times 10^{-31}$ kg, dan $r_1 = 0,528 \text{ \AA}$, tentukan:

- jari-jari orbit;
- gaya elektron yang bekerja pada elektron;
- gaya sentripetal pada elektron;
- kelajuan elektron.

Solusi

- a. Jari-jari orbit untuk $n = 4$ adalah

$$r_n = n^2 r_1 \text{ atau } r_4 = 4^2 \times 0,528 \text{ \AA} = 8,45 \text{ \AA} = 8,45 \times 10^{-10} \text{ m.}$$

- b. Gaya elektrostatis pada elektron adalah

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2} = k \frac{e^2}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{(1,6 \times 10^{-19})^2}{(8,45 \times 10^{-10})^2} = 3,23 \times 10^{-10} \text{ N}$$

- c. Gaya elektrostatis berfungsi sebagai gaya sentripetal sehingga

$$F_s = 3,23 \times 10^{-10} \text{ N}$$

d. Kelajuan electron dihitung dari rumus gaya sentripetal

$$F_s = m \frac{v^2}{r} \quad \text{atau} \quad v = \sqrt{\frac{rF_s}{m}} \quad \text{sehingga}$$

$$v = \sqrt{\frac{8,45 \times 10^{-10} (3,23 \times 10^{-10})}{9,1 \times 10^{-31}}} = 5,48 \times 10^5 \text{ m/s}$$

Kelajuan elektron dapat juga dihitung dengan rumus momentum sudut

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad \text{atau} \quad v = \frac{nh}{2\pi mr} \quad \text{sehingga}$$

$$v = \frac{4 \times 6,62 \times 10^{-34}}{2 \times 3,14 \times 9,1 \times 10^{-31} \times 8,45 \times 10^{-10}} = 5,45 \times 10^5 \text{ m/s}$$



Sumber: Dokumen pribadi, 2006

Teori Relativitas Khusus

Teori relativitas khusus kalipertama diperkenalkan oleh **Albert Einstein** (1879-1955) pada 1905. Teori ini merupakan hasil penelaahan atas konsep mekanika Newton, teori elektromagnetik Maxwell dan percobaan Michelson-Morley. Perubahan yang dibawa teori ini sangat mendasar dan revolusioner dengan kesuksesannya yang luar biasa, di antaranya yang paling terkenal adalah konsep kesetaraan antara massa dan energi. Konsep tersebut merupakan salah satu konsekuensi penting dari teori relativitas khusus. Konsep itu telah memungkinkan manusia untuk dapat menghasilkan energi yang berlipat-lipat besarnya di Pusat Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Di lain pihak, konsep ini pun menimbulkan perkembangan senjata nuklir yang semasa perang dingin menjadi alat politik Amerika Serikat dan Rusia.

Bab 7

Standar Kompetensi

Menganalisis berbagai besaran fisis pada gejala kuantum dan batas-batas berlakunya relativitas Einstein dalam paradigma fisika modern

Kompetensi Dasar

Memformasikan teori relativitas khusus untuk waktu, panjang, dan massa serta kesetaraan massa dengan energi yang diterapkan dalam teknologi.

- A. Transformasi Galileo dan Percobaan Michelson-Morley
- B. Prinsip-Prinsip Relativitas Einstein

Kata Kunci

Gerak
Kerangka Awan

A. Transformasi Galileo dan Percobaan Michelson-Morley

Peristiwa dalam fisika didefinisikan sebagai segala sesuatu yang terjadi pada suatu titik tertentu dalam ruang dan pada suatu waktu tertentu. Gerak sebuah benda merupakan sebuah rentetan acuan pengamatan terhadap gerak benda tersebut. Tanpa sistem kerangka acuan konsep gerak benda tidak ada artinya.

Apabila Anda hendak mempelajari benda yang sedang bergerak dalam arah horizontal, Anda dapat memilih sebuah kerangka acuan yaitu suatu tempat tertentu yang diam terhadap benda tersebut. Anda dapat pula memilih kerangka acuan lain, yang bergerak dengan kecepatan tetap terhadap benda tersebut. Menurut seorang pengamat dalam kerangka acuan ini, benda tersebut sedang melakukan gerakan dalam arah horizontal dengan kecepatan tetap. Kerangka acuan yang diam atau bergerak dengan kecepatan tetap terhadap benda yang sedang diamati tersebut dikenal dengan nama kerangka acuan inersial.

Dengan demikian, semua gerak akan dapat dinyatakan sebagai gerak relatif terhadap suatu kerangka acuan tertentu yang melekat dengan pengamat atau sebagai tempat melakukan pengamatan. Pada dasarnya, ada kebebasan untuk memilih kerangka acuan ini. Akan tetapi, tentu saja dalam praktiknya Anda akan memilih kerangka acuan yang memungkinkan penyelesaian persoalan dengan cara yang paling sederhana.

Kerangka acuan yang telah dipilih untuk menelaah suatu peristiwa fisika selalu dapat dikaitkan dengan suatu sistem koordinat tertentu. Selanjutnya, hukum-hukum fisika yang berlaku dalam kerangka acuan yang telah dipilih dinyatakan dalam sistem koordinat tersebut. Contoh sistem koordinat yang dipakai adalah sistem koordinat kartesius, sistem koordinat silinder, atau sistem koordinat bola.

Para pakar fisika percaya bahwa hukum-hukum alam bersifat mutlak. Hal ini berarti bahwa hukum-hukum fisika yang menggunakan hukum alam tersebut tidak bergantung pada pemilihan kerangka acuan yang diambil. Dalam kerangka acuan apapun seharusnya hukum-hukum fisika tetap sama. Persyaratan bahwa hukum-hukum fisika bersifat mutlak ini dikenal dengan prinsip relativitas.

Prinsip relativitas merupakan prinsip yang paling mendasar dalam fisika. Dengan demikian, prinsip relativitas mensyaratkan bahwa hukum-hukum fisika memiliki bentuk yang sama dalam sistem koordinat mana pun yang dipilih. Persamaan yang berlaku seperti itu disebut persamaan yang invarian. Jadi, jika terdapat dua pengamat yang merumuskan hukum fisika secara relatif terhadap masing-masing sistem koordinatnya, hubungan atau persamaan yang mengaitkan koordinat-koordinat kedua sistem koordinat itu haruslah sedemikian rupa sehingga bentuk hukum fisika tidak berubah (invarian). Hubungan atau persamaan yang mengaitkan koordinat-koordinat kedua sistem koordinat ini dikenal sebagai transformasi koordinat.

Berdasarkan ruang lingkup hukum-hukum fisika yang ditinjau terdapat tiga prinsip relativitas yang dikemukakan antara lain sebagai berikut.

1. Prinsip relativitas Galileo dengan transformasi koordinat adalah transformasi Galileo.
2. Prinsip relativitas khusus Einstein dengan transformasi koordinatnya adalah transformasi Lorentz.
3. Prinsip relativitas umum Einstein dengan transformasi koordinatnya adalah transformasi koordinat umum.

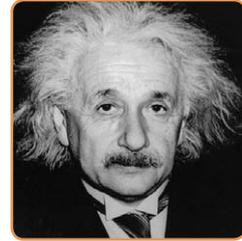
1. Transformasi Galileo

Prinsip relativitas Galileo dikenal pula sebagai prinsip relativitas klasik. Karena hanya berkaitan dengan hukum-hukum gerak Newton. Persoalan perambatan gelombang elektromagnetik (cahaya) tidak ditinjau dalam prinsip ini. Prinsip relativitas Galileo tersebut dibangun berdasarkan dua postulat antara lain sebagai berikut.

- a. Waktu adalah besaran mutlak.
- b. Hukum-hukum gerak Newton tidak berubah bentuk (invarian).

Selanjutnya kita akan menurunkan transformasi koordinat yang memenuhi prinsip relativitas Galileo tersebut. Transformasi ini dikenal dengan nama transformasi Galileo. Kita akan meninjau dua sistem kerangka acuan S dan S^* . Kerangka acuan S^* bergerak relatif terhadap S sepanjang suatu garis lurus ke kanan dengan laju v .

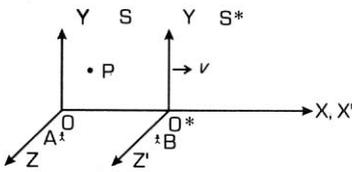
Fisikawan Kita



Albert Einstein
(1897-1955)

Einstein lahir di Ulm, Jerman. Ia belajar fisika di Politeknik Zurich. Pada 1905, Einstein menlis tiga buah makalah yang menguji ide dasar ilmu pengetahuan, yaitu dualisme cahaya sebagai partikel dan gelombang, gerak Brownian, dan teori relativitas. Ungkapan Einstein yang terkenal adalah "Tuhan tidak bermain dadu dengan dunia ini". Menggambarkan pendapat Einstein tentang semua yang ada di alam ini pasti mengikuti kaidah atau hukum alam tertentu.

Sumber: www.imagination.com, 2006



Gambar 7.1

Kerangka S* bergerak relatif terhadap S dalam arah sumbu x.

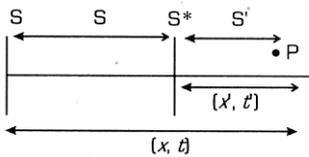
Misalnya, dua orang pengamat A dan B yang masing-masing berada dalam kerangka acuan S dan S* sedang mempelajari gerak benda P di bawah pengaruh gaya F. Menurut A benda P memiliki kedudukan x dan waktu t. Sementara menurut B, benda P memiliki kedudukan x' dan t'. Postulat pertama Galileo memberikan persyaratan:

$$t = t'$$

yang menyatakan bahwa apabila benda P telah menempuh jarak 6 m dan menurut pengamat A, misalnya selang waktu yang diperlukan benda P tersebut 60 sekon maka menurut postulat $t = t'$ pengamat B akan mencatat waktu 60 sekon.

Postulat kedua Galileo memberikan persyaratan terhadap hukum Newton.

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2} = F' = m \frac{d^2 x'}{dt'^2}$$



Gambar 7.2

Kedudukan P relatif terhadap S dan S*.

Apabila menurut pengamat A, hukum Newton memiliki bentuk:

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2}$$

Menurut pengamat B, hukum Newton juga harus memiliki bentuk yang serupa, yaitu:

$$F' = m \frac{d^2 x'}{dt'^2}$$

Jadi, seandainya menurut pengamat A gaya yang bekerja pada benda P hilang, yaitu $F = 0$, menurut postulat kedua Galileo, pengamat B harus mendapatkan $F' = 0$. Dengan demikian persamaan

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2} = F' = m \frac{d^2 x'}{dt'^2}$$

menjadi:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d^2 x'}{dt'^2} = 0$$

Dengan cara mengintegrasikan kedua ruas persamaan $\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d^2 x'}{dt'^2} = 0$ sebanyak dua kali maka akan diperoleh hasil sebagai berikut.

$$x = x_0 + u_x t$$

$$x' = x'_0 + u'_x t$$

dengan x_0 , x'_0 , dan u_x merupakan konstanta-konstanta integrasi.

Dari analisis konsistensi dimensi, ruas kiri persamaan berdimensi panjang. Oleh sebab itu, demikian juga seharusnya untuk sisi sebelah kanan dan dapat langsung diperoleh bahwa x_0 dan x'_0 merupakan jarak awal benda P sebelum bergerak dengan laju v menurut pengamat A dan B, sedangkan u_x dan u'_x merupakan kecepatan benda P menurut pengamat A dan B.

Apabila persamaan $x' = x'_0 + u'_x t$ dikurangi maka akan diperoleh

$$(x' - x) = (x'_0 - x_0) + (u'_x - u_x)t$$

Jelas bahwa besaran $(x' - x) = x$ menyatakan kedudukan titik asal O^* pada kerangka acuan S^* relatif terhadap titik asal O pada kerangka acuan S . Besaran turunan x adalah:

$$\frac{dx}{dt} = v$$

yang merupakan kecepatan relatif kerangka acuan S^* terhadap S . Jadi apabila diturunkan terhadap awaktu persamaan $(x' - x) = (x'_0 - x_0) + (u'_x - u_x)t$ akan menjadi:

$$v = u_x + u'_x$$

atau

$$u'_x = u_x - v$$

Coba Anda substitusikan persamaan $u'_x = u_x - v$ dalam persamaan $(x' - x) = (x'_0 - x_0) + (u'_x - u_x)t$ dan dengan mengambil $x'_0 = x_0$ akan diperoleh hasil

$$x' = x - vt$$

Oleh karena tidak ada gerak dalam arah Y dan Z . Maka,

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Jadi, transformasi Galileo yang menghubungkan sistem kerangka acuan S dan S^* yang memenuhi postulat relativitas Galileo adalah persamaan-persamaan

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

Sistem kerangka acuan yang berlaku dalam relativitas Galileo ini adalah kerangka acuan inersial. Karena ketika menurunkan transformasi Galileo di atas, kerangka acuan S^* bergerak dengan kecepatan tetap v terhadap kerangka acuan S . Di samping itu, postulat kedua juga mengandung pengertian bahwa kerangka acuan yang ditinjau adalah kerangka acuan inersial. Hal ini disebabkan karena hukum Newton hanya berlaku dalam kerangka acuan inersial.

Contoh Soal 7.1

Sebuah kereta api bergerak dengan kecepatan 60 km/jam. Seorang penumpang berjalan dalam kereta dengan kecepatan 6 km/jam searah dengan kereta. Berapa kecepatan penumpang tersebut terhadap orang yang diam di tepi rel?

Jawab:

Kita dapat menyelesaikannya dengan persamaan transformasi Galileo untuk kecepatan:

$$u'_x = u_x - v$$

orang yang diam di tepi rel sebagai kerangka acuan S . Kereta api yang bergerak terhadap orang diam sebagai kerangka acuan S^* . Kecepatan kerangka acuan S^* terhadap kerangka acuan S adalah $v = 60$ km/jam. Kecepatan penumpang terhadap kerangka acuan S^* adalah $u'_x = 6$ km/jam.

Jadi kecepatan penumpang (u_x) terhadap orang yang diam adalah $u_x = u'_x + v = 55$ km/jam.

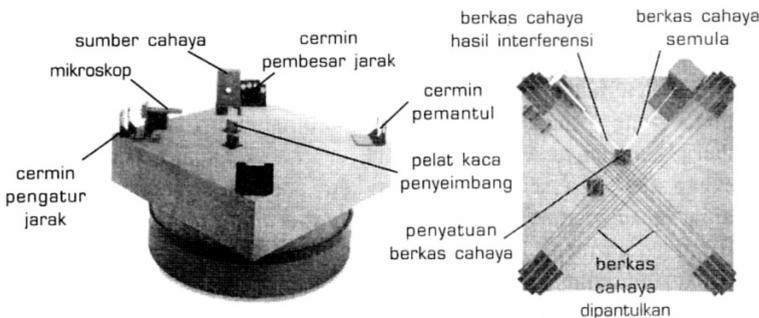
Uji Kemampuan 7.1

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Mengapa semua gerak benda dinyatakan sebagai gerak relatif? Bagaimana kedudukan antara gerak relative yang satu dan lainnya?
2. Coba Anda jelaskan keterkaitan Hukum Newton dan transformasi Galileo.

2. Percobaan Michelson-Morley

Fenomena gelombang sering Anda jumpai dalam kehidupan sehari-hari, seperti gelombang permukaan air, gelombang tali, ataupun gelombang bunyi. Gelombang itu sendiri merupakan gangguan yang menjalar. Gelombang-gelombang tersebut memerlukan medium. Pada gelombang tali dan gelombang permukaan air, gangguan itu berupa bentuk yang menjalar dalam medium. Adapun pada gelombang bunyi, gangguannya adalah berupa perbedaan tekanan udara sehingga dalam ruang hampa udara kita tidak dapat berkomunikasi lewat bunyi.



Gambar 7.3

Alat interferometer pada percobaan Michelson-Morley.

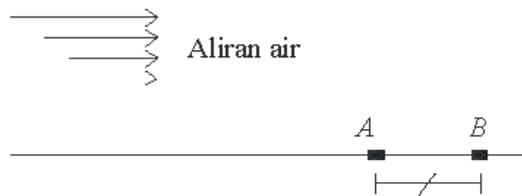
Ketika itu sangat sulit untuk membayangkan perambatan gelombang tanpa melalui medium. Semua gelombang yang telah dikenal ketika itu menunjukkan bahwa perambatannya melalui medium.

Apabila kita telaah gelombang bunyi berbeda dengan gelombang cahaya. Gelombang cahaya dapat merambat dalam ruang hampa udara, buktinya adalah bahwa sinar

matahari yang dapat sampai ke bumi. Fenomena tersebut mendorong para pakar fisika abad ke-19 untuk menghipotesis keberadaan eter sebagai medium lain. Karena harus ada dalam ruang hampa dan juga dalam bahan tembus cahaya. Jelaslah bahwa eter tidak mungkin seperti materi biasa, yang memiliki kerapatan dan komposisi kimia. Karena tidak mungkin materi yang semacam ini berada dalam ruang hampa. Eter haruslah memenuhi seluruh ruang, bahkan sampai bintang yang terjauh sekalipun. Karena cahaya ada di mana-mana, termasuk di tempat yang terjauh.

Lalu, bagaimanakah cara kita untuk mengamati gerak eter tersebut? Caranya adalah dengan menjalarkan gelombang dalam medium (eter).

Sebagai ilustrasi awal, perhatikan suatu aliran air di sungai seperti tampak pada gambar berikut.



Gambar 7.4

Skema Aliran Air Sungai

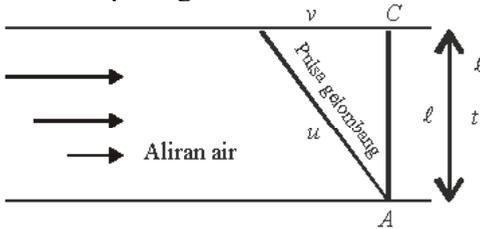
Misalkan kita menjalarkan sebuah pulsa gelombang lurus di A sejajar tepi sungai. Lalu, kita mengukur waktu yang diperlukan untuk sampai ke B yang berjarak l dari A. Kemudian, waktu yang terukur itu kita bandingkan dengan yang diperlukan oleh gelombang untuk menjalar dari B ke A. Apabila aliran air berkelajuan v sementara pulsa gelombang berkelajuan u maka waktu yang diperlukan gelombang untuk menjalar dari A ke B dan kemudian kembali lagi ke A adalah

$$t_{//} = t_{AB} + t_{BA} = \frac{l}{u+v} + \frac{l}{u-v} = \frac{2lu}{u^2 - v^2}$$

Anda pun dapat menuliskan lagi menjadi

$$t_{//} = \frac{2l}{u} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{u^2}}$$

Lalu, kita mengirimkan pulsa gelombang ke arah tegak lurus aliran air, seperti gambar berikut.



Gambar 7.5

Pulsa Gelombang dalam aliran air.

Apabila pulsa kita kirimkan langsung ke C, pulsa ini tidak akan sampai karena akan terhanyut ke hilir. Oleh karena itu, pulsa harus kita kirimkan sedikit ke hulu. Laju relatif pulsa terhadap tanah haruslah sebesar

$$u' = \sqrt{u^2 - v^2}$$

Setelah tiba di C pulsa akan dipantulkan dan akan sampai di A lagi. Waktu yang diperlukan pulsa dalam penjalanan bolak-balik ini adalah

$$t_{\perp} = \frac{2l}{\sqrt{u^2 - v^2}} = \frac{2l}{u} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{u^2}}}$$

selisih antara waktu t_{\parallel} dan t_{\perp} adalah

$$t_{\parallel} - t_{\perp} = \frac{2l}{u} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{u^2}}} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{u^2}}} - 1 \right)$$

Untuk kasus gerak bumi dalam eter, persamaan di atas dapat disederhanakan lebih lanjut. Dalam hal ini, laju aliran sungai di atas merupakan analogi laju eter sedangkan pulsa gelombang menyebar analogi gelombang cahaya. Laju bumi v dalam orbitnya mengelilingi Matahari jauh lebih kecil daripada laju pulsa gelombang cahaya. Dengan demikian, dapat digunakan pendekatan sebagai berikut.

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} \cong 1 + \frac{v^2}{2c^2}$$

Persamaan di atas dapat menjadi

$$t_{\parallel} - t_{\perp} = \frac{2l}{c} \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} - 1\right)$$

$$t_{\parallel} - t_{\perp} = \frac{2l}{c} \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) \left(\frac{v^2}{2c^2}\right)$$

Oleh karena $\frac{v^2}{2c^2}$ sangat kecil, $\left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) \cong 1$. Jadi, persamaan di atas menjadi

$$t_{\parallel} - t_{\perp} = \left(\frac{2l}{c}\right) (1) \left(\frac{v^2}{2c^2}\right)$$

$$t_{\parallel} - t_{\perp} = \frac{l}{c} \cdot \frac{v^2}{c^2}$$

Pada 1887, Michelson dan Morley melakukan percobaan untuk mengukur ($t_{\parallel} - t_{\perp}$) pulsa gelombang cahaya. Mereka membanding waktu yang diperlukan cahaya untuk merambat bolak-balik sepanjang arah gerak eter terhadap bumi dengan waktu yang diperlukan bolak-balik tegaklurus arah ini. Dalam percobaan mereka, yang digunakan $l = 11$ m. Jadi beda waktu yang diharapkan dapat diamati apabila memang eter ada adalah:

$$t_{\parallel} - t_{\perp} = 11 \text{ m} \times (1,0 \times 10^{-4}) : 3 \times 10^8 = 3,7 \times 10^{-16} \text{ s}$$

Selisih waktu ini sangat pendek, bagaimanakah cara mengukurnya? Michelson telah menghabiskan waktunya selama 50 tahun untuk membuat alat yang memiliki ketelitian yang sebanding dengan kecilnya selisih waktu

tersebut. Alat yang dipergunakan dikenal sebagai interferometer Michelson.

Hasil percobaan Michelson bahwa laju cahaya bersifat *isotropik*, artinya tidak bergantung pada arah pengamatan. Pengukuran laju cahaya, yang dilakukan dalam arah manapun, tetap akan memberikan hasil yang sama. Dengan kenyataan itu, laju cahaya dikatakan merupakan besaran mutlak. Karena pengukurannya tidak bergantung pada kerangka acuan yang dipilih. Pernyataan ini telah dijadikan Einstein sebagai postulat pertama prinsip relativitas khusus.

Konsekuensi lain dari fakta tersebut adalah apabila memang ada maka eter haruslah dalam keadaan diam dalam kerangka acuan bumi. Akan tetapi, kerangka acuan serupa ini tidak ada keistimewaannya. Karena tidak akan mempengaruhi pengukuran-pengukuran yang kita lakukan. Dengan demikian, konsep eter itu tidak perlu ada dan para pakar fisika sekarang yakin bahwa eter itu memang benar tidak ada. Perlu juga catatan tambahan, bahwa fenomena elektromagnetik (cahaya) tidak bersesuaian dengan prinsip relativitas Galileo. Apabila kita paksakan transformasi Galileo berlaku di sini maka pengukuran kelajuan cahaya dalam kerangka acuan S dan S^* haruslah memenuhi persamaan

$$c' = c - v$$

dengan c adalah laju cahaya menurut kerangka acuan S . Sementara c' adalah laju cahaya menurut kerangka acuan S^* . Akan tetapi, hasil dari percobaan **Michelson-Morley** menunjukkan bahwa ternyata $c' = c$. Jelas bahwa transformasi kecepatan Galileo tersebut tidak berlaku dalam fenomena elektromagnet.

Uji Kemampuan 7.2

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Sebutkan latar belakang hipotesis fisikawan abad ke-19 tentang adanya eter.
2. Jelaskan metode eksperimen Michelson Morley. Kesimpulan-kesimpulan apakah yang dapat diperoleh dari eksperimen Michelson-Morley tersebut.



Eksperimen 7.1

Coba Anda diskusikan peristiwa-peristiwa berikut ini dengan teman-teman sekelas dibimbing dengan guru.

1. Sebuah lampu kilat terletak 30 km dari seorang pengamat. Lampu dinyalakan dan pengamat melihat kilatannya pada jam 13.00. Pada jam berapakah sebenarnya lampu itu dinyalakan?
2. Andaikata sebuah jam B terletak pada jarak L dari seorang pengamat. Jelaskan bagaimana jam ini dapat diserempakkan dengan jam A yang berada pada kedudukan pengamat.

Coba Anda simpulkan dari kejadian peristiwa-peristiwa tersebut.

B. Prinsip-Prinsip Relativitas Einstein

Prinsip relativitas Galileo hanya terbatas membuat persamaan gerak Newton invarian. Akan tetapi, persamaan elektromagnetik Maxwell tidak akan invarian lagi apabila prinsip relativitas Galileo itu kita coba paksakan untuk dapat diaplikasikan. Eksperimen Michelson-Morley telah menghasilkan kesimpulan bahwa prinsip relativitas Galileo tidak akan berlaku dalam gejala elektromagnetik. Padahal gejala elektromagnetik yang dirumuskan secara lengkap oleh persamaan-persamaan Maxwell sangat terkait dengan pengukuran-pengukuran dalam mekanika. Untuk itu, perlu memperluas prinsip relativitas Galileo sedemikian hingga juga persamaan elektromagnetik Maxwell, yaitu suatu prinsip relativitas yang dapat membuat persamaan Maxwell invarian.

Perluasan prinsip relativitas Galileo dirumuskan kali pertama oleh Einstein pada 1905 yang terkenal dengan nama prinsip relativitas khusus Einstein.

Berikut ini adalah prinsip relativitas Einstein yang didasarkan pada dua postulatnya.

1. Kelajuan cahaya (c) dalam ruang hampa adalah suatu besaran mutlak.
2. Hukum-hukum mekanika Newton dan elektromagnetik Maxwell invarian dalam berbagai kerangka inersial.

Hal penting yang langsung dapat diturunkan dari prinsip di atas adalah bahwa waktu ternyata merupakan besaran

yang relatif. Bukti pernyataan tersebut sangat mudah. Tinjaulah pengamat A dalam kerangka acuan S yang diam dan pengamat B dalam kerangka acuan S^* yang sedang bergerak relatif terhadap S dengan kecepatan tetap. Kedua pengamat tersebut sedang mengukur laju cahaya. Menurut pengamat A , laju cahaya tersebut adalah c dan menurut pengamat B lajunya c' . Maka,

$$c^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2$$

$$c'^2 = \left(\frac{dx'}{dt'}\right)^2$$

Menurut postulat pertama, haruslah dipenuhi

persyaratan

$$c^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = \left(\frac{dx'}{dt'}\right)^2$$

Akan tetapi, karena jarak yang ditempuh cahaya dalam kerangka S yang diam pada umumnya belum tentu sama dengan yang ditempuh dalam kerangka acuan S^* yang bergerak. Maka,

$$dx \neq dx'$$

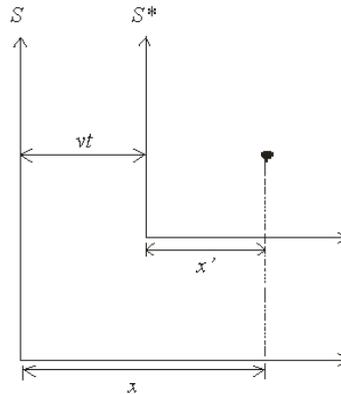
$$c^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = \left(\frac{dx'}{dt'}\right)^2$$

Dengan demikian, agar persamaan tetap terpenuhi maka, $dx \neq dt'$ yang menyatakan bahwa waktu merupakan besaran relatif.

1. Transformasi Lorentz

Kita akan menurunkan suatu transformasi koordinat yang menghubungkan kerangka acuan inersial S dan S^* yang memenuhi persyaratan prinsip relativitas khusus Einstein. Oleh karena waktu merupakan besaran relatif maka kita perlu mencari persamaan yang mengaitkan besaran waktu tersebut dari kerangka acuan S ke kerangka acuan S^* . Selain itu, kita perlu mencari juga persamaan transformasi untuk x karena benda yang ditinjau diasumsikan bergerak dalam

arah sumbu x seperti yang telah dilakukan dalam transformasi Galileo.



Gambar 7.6

Kerangka awan S^* bergerak relatif terhadap kerangka awan S .

Coba Anda perhatikan gambar di atas mengenai hubungan antara x dan x' ialah

$$x' = k(x - vt)$$

k merupakan faktor pembanding yang tidak bergantung pada x atau t , tetapi dapat merupakan fungsi dari u .

Untuk menuliskan persamaan yang bersesuaian untuk x dinyatakan dalam x' dan t' . Oleh karena hukum fisika harus berbentuk sama, hubungan ini pun harus memiliki konstanta kesebandingan yang sama. Dengan demikian,

$$x = k(x' + vt')$$

t dan t' tidaklah sama. Ini dapat kita lihat dengan cara mensubstitusikan x' yang diperoleh dari persamaan $x' = k(x - vt)$ ke persamaan $x = k(x' + vt')$. Kita akan memperoleh persamaan yang baru, yaitu

$$x = k^2(x - vt) + kv t'$$

Maka dari sini kita dapat memperoleh persamaan

$$t' = kt + \left(\frac{1 - k^2}{kv} \right) x$$

Persamaan $x' = k(x - vt)$, $x = k(x' + vt')$, dan

$$t' = kt + \left(\frac{1-k^2}{kv} \right) x$$

merupakan tranformasi koordinat yang dimiliki postulat relativitas Einstein.

Harga k dapat diperoleh pada saat $t = 0$, titik asal kedua kerangka S dan S^* berada pada tempat yang sama. Maka $t' = 0$ juga. Masing-masing pengamat melakukan pengukuran kelajuan cahaya yang memancar dari titik itu. Kedua pengamat harus mendapatkan kelajuan yang sama, yaitu c . Berarti dalam kerangka S .

$$x = c.t$$

sedangkan dalam kerangka S^*

$$x' = c.t'$$

Coba Anda substitusikan x' dari persamaan $x' = k(x - vt)$

$$t' = kt + \left(\frac{1-k^2}{kv} \right) x$$

dan t' dari persamaan sehingga Anda dapat memperoleh persamaan

$$k(x - vt) = ckt + \left(\frac{1-k^2}{kv} \right) cx$$

Persamaan tersebut dapat disusun kembali agar memperoleh x

$$x = \frac{ckt + vkt}{k - \left(\frac{1-k^2}{kv} \right) c} = ct \left(\frac{k + \frac{v}{c}k}{k - \left(\frac{1-k^2}{kv} \right) c} \right) = ct \left(\frac{k + \frac{v}{c}}{1 - \left(\frac{1}{k^2} - 1 \right) \frac{c}{v}} \right)$$

Rumusan untuk x ini akan sama dengan yang dihasilkan oleh persamaan $x = c.t$. Jadi,

$$ct = ct \left(\frac{k + \frac{v}{c}}{1 - \left(\frac{1}{k^2} - 1 \right) \frac{c}{v}} \right)$$

$$1 = \frac{k + \frac{v}{c}}{1 - \left(\frac{1}{k^2} - 1\right) \frac{c}{v}}$$

Sehingga akan diperoleh persamaan

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Dengan memasukkan k dalam persamaan $x' = k(x - vt)$

$$t' = kt + \left(\frac{1 - k^2}{kv}\right)x$$

dan Anda memperoleh persamaan transformasi lengkap dari pengukuran suatu kejadian dalam S terhadap pengukuran yang sesuai dilakukan dalam S^* , memenuhi persamaan:

$$t' = \frac{1 - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ atau } t' = k \left(t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Selanjutnya, akan ditinjau gerak relatif kerangka acuan S terhadap kerangka acuan S^* . Kerangka acuan S^* yang semula bergerak ke arah sumbu x positif dengan kecepatan tetap v menjadi diam. Sementara itu, kerangka acuan S yang semula diam, sekarang bergerak ke arah sumbu x negatif sehingga kecepatan relatifnya adalah $-v$. Transformasi koordinat untuk gerak relatif ini mirip dengan transformasi koordinat persamaan

$$t' = \frac{1 - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad \text{dan} \quad z' = z. \quad \text{Karena}$$

kedua gerak relatif di atas setara. Perbedaannya hanyalah arah kecepatan relatif masing-masing kerangka acuan tersebut yaitu dari v menjadi $-v$. Jadi, transformasi koordinatnya menjadi:

$$t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{atau} \quad t = k \left(t' + \frac{vx'}{c^2} \right)$$

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

Transformasi koordinat ini dikenal dengan nama transformasi Lorentz. Nama ini di ambil untuk menghormati **Hendrik Anton Lorentz** seorang pakar fisika yang berkebangsaan Belanda. Persamaan-persamaan ini kali pertama diusulkan dalam bentuk yang sedikit berbeda oleh Lorentz pada 1904. Ia mengajukan persamaan-persamaan ini untuk menjelaskan hasil nol dalam percobaan Michelson-Morley dan untuk membuat persamaan-persamaan ini Maxwell mengambil bentuk yang sama untuk semua kerangka acuan inersial. Setahun kemudian, Einstein menurunkan persamaan-persamaan ini secara independen berdasarkan pada teori relativitas.

2. Transformasi Lorentz untuk Kecepatan

Seperti biasanya, kecepatan dapat kita peroleh dari turunan pertama fungsi kedudukan terhadap waktu.

$$u_x = \frac{dx}{dt}$$

Dari persamaan $x = kx' + kv t'$ dengan k dan v konstan. Apabila variabel x , x' , dan t' kita tarik diferensialnya maka diperoleh

$$dx = k dx' + kv dt'$$

Dari persamaan

$$t = k \left(t' + \frac{vx'}{c^2} \right)$$

$$t = kt' + \frac{kv}{c^2} x'$$

Apabila variabel t , t' , dan x' kita tarik diferensialnya maka kita peroleh

$$dt = k dt' + \frac{kv}{c^2} dx'$$

Masukkan lemen dx dari persamaan $dx = k dx' + kv dt'$ dan

dt dari persamaan $dt = k dt' + \frac{kv}{c^2} dx'$ ke dalam persamaan $dx = k dx' + kv dt'$. Maka, kita peroleh kecepatan u_x sebagai berikut.

$$u_x = \frac{dx}{dt} = \frac{k dx' + kv dt'}{k dt' + \frac{kv}{c^2} dx'} \times \frac{\left(\frac{1}{dt'} \right)}{\left(\frac{1}{dt'} \right)}$$

$$u_x = \frac{k \frac{dx'}{dt'} + kv}{k + \frac{kv}{c^2} \frac{dx'}{dt'}}$$

$$u_x = \frac{ku_x' + kv}{k + \frac{kv}{c^2} u_x'}, \text{ sebab } \frac{dx'}{dt'} = u_x'$$

$$u_x = \frac{k(u'_x + v)}{k\left(1 + \frac{v}{c^2}u'_x\right)}$$

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2}u'_x}$$

Sekarang kita akan menentukan kecepatan pada sumbu y, u_y . Dari persamaan $y = y'$, sehingga $d_y = d'_y$

$$u_y = \frac{dy}{dt} = \frac{dy'}{kdt' + \frac{kv}{c^2}dx'} \times \left(\frac{1}{dt'}\right)$$

$$u_y = \frac{\frac{dy'}{dt'}}{k + \frac{kv}{c^2} \frac{dx'}{dt'}}$$

$$u_x = \frac{u'_y}{k + \frac{kv}{c^2}u'_x}, \text{ sebab } \frac{dy'}{dt'} = u'_y \text{ dan } \frac{dx'}{dt'} = u'_x$$

$$u_y = \frac{1}{k} \frac{u'_y}{\left(1 + \frac{v}{c^2}u'_x\right)}$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow \frac{1}{k} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

sehingga

$$u_y = \frac{u'_y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{vu'_x}{c^2}}$$

Dengan cara yang sama dapat kita peroleh kecepatan pada sumbu z , u_z

$$u_z = \frac{u_z \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{vu_x}{c^2}}$$

Akhirnya dapat kita peroleh hasil transformasi Lorentz untuk kecepatan, yaitu:

$$u_x = \frac{u_x + v}{1 + \frac{v}{c^2} u_x}$$

$$u_y = \frac{u_y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{vu_x}{c^2}}$$

$$u_z = \frac{u_z \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{vu_x}{c^2}}$$

ataupun transformasi kebalikannya:

$$u_x = \frac{u_x - v}{1 + \frac{v}{c^2} u_x}$$

$$u_y = \frac{u_y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{vu_x}{c^2}}$$

$$u_z = \frac{u_z \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{vu_x}{c^2}}$$

3. Penjumlahan Kecepatan Berdasarkan Relativitas Einstein

Kita akan mencoba membatasi kecepatan hanya pada salah satu arah saja, yaitu arah horizontal (sepanjang sumbu x). Misalnya, suatu sistem S' bergerak dengan kecepatan v dalam arah x terhadap sistem lain S (kita tetapkan sebagai kerangka acuan diam). Kemudian, pada sistem S' bergerak suatu benda dengan kecepatan u'_x dalam arah x . Maka, kecepatan benda tersebut terhadap sistem S yaitu u_x dirumuskan sesuai dengan persamaan pertama yaitu:

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}$$

Contoh Soal 7.2

- Pesawat angkasa P berkecepatan $0,9 c$ terhadap bumi. Apabila pesawat angkasa Q bergerak melewati pesawat P dengan kecepatan relatif $0,5 c$ terhadap pesawat P , berapakah kecepatan pesawat Q terhadap bumi?

Jawab:

Pesawat Q memerlukan kecepatan relatif terhadap bumi adalah $0,9 + 0,5 = 1,4 c$, jelas tidak mungkin. Akan tetapi, menurut persamaan relativitas dengan $v'_x = 0,5 c$, $v = 0,9 c$, kecepatan relatif yang diperlukan adalah:

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}$$

$$u_x = \frac{0,5 c + 0,9 c}{1 + \frac{(0,5 c)(0,9 c)}{c^2}}$$

$$u_x = 0,9655 c$$

Jadi, kecepatan pesawat angkasa Q relatif terhadap bumi sebesar $0,9655 c$ lebih kecil dari kecepatan cahaya.

- Dua pesawat A dan B bergerak dalam arah yang berlawanan. Kelajuan pesawat A sebesar $0,5 c$ dan kelajuan pesawat B adalah $0,4 c$. Tentukanlah kelajuan pesawat A relatif terhadap B.

Jawab:

Kita mencoba tentukan arah kanan sebagai arah positif, b bergerak ke arah kiri.

Berdasarkan relativitas Einstein

$$v_{AB} = \frac{v_A - v_B}{1 - \frac{v_A \cdot v_B}{c^2}}$$

$$v_{AB} = \frac{0,5 c - (-0,4 c)}{1 - \frac{(0,5 c)(-0,4 c)}{c^2}}$$

$$v_{AB} = \frac{0,9 c}{1,2}$$

$$v_{AB} = 1,75 c$$

Uji Kemampuan 7.3

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Sebuah sepeda motor super dapat melesat dengan kelajuan $0,8c$ melewati seorang pengamat di tepi jalan. Jika pengemudi melemparkan bola ke arah depan dengan kelajuan $0,7c$ relatif terhadap dirinya sendiri, berapakah kelajuan bola menurut pengamat?
2. Partikel B bergerak terhadap A dengan kecepatan $0,8c$ ke kanan. Partikel C bergerak terhadap B dengan kecepatan $0,6c$ ke kanan. Tentukan kecepatan partikel C relatif terhadap A berdasarkan:
 - a. relativitas Newton;
 - b. relativitas Einstein.

4. Akibat Prinsip-Prinsip Relativitas Einstein

a. Kontraksi Lorentz (Kontraksi Panjang)

Misalkan sebuah batang dengan panjang L_0 berada pada sumbu x dari kerangka acuan diam S . Koordinat ujung-ujung batang pada kerangka acuan S adalah x_1 dan x_2 sehingga $x_2 - x_1 = L_0$. Kemudian, batang tersebut melekat pada kerangka acuan S' yang bergerak dengan kecepatan v terhadap kerangka S . Koordinat ujung-ujung batang pada kerangka S' adalah x_1' dan x_2' sehingga $x_2' - x_1' = L$. Waktu pengukuran koordinat x_1' adalah bersamaan dengan waktu pengukuran koordinat x_2' (dalam kerangka acuan S') sehingga $t_1' = t_2'$. Sesuai dengan persamaan

$$x = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (x' + vt')$$

Maka,

$$x_2 - x_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} [(x_2' + vt_2') - (x_1' + vt_1')]$$

$$x_2 - x_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} [(x_2' - x_1') + v(t_2' - t_1')]$$

$$x_2 - x_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (x_2' - x_1') \text{ sebab } t_2' - t_1' = 0$$

$$L_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} L = kL$$

$$L = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} L_0 = \frac{1}{k} L_0$$

dengan:

L = panjang benda bergerak yang diamati oleh kerangka diam

L_0 = panjang benda yang diam pada suatu kerangka acuan

v = kecepatan benda terhadap kerangka diam

c = kecepatan cahaya dalam ruang hampa udara m/s

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} > 1$$

Tetapan transformasi k adalah bilangan yang selalu besar dari

$$1 \text{ (} k > 1 \text{) sehingga dalam persamaan } L = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} L_0 = \frac{1}{k} L_0,$$

selalu lebih kecil daripada L_0 . Dapat kita simpulkan bahwa benda yang bergerak akan tampak lebih pendek apabila diukur dari kerangka acuan diam ($L < L_0$). Peristiwa penyusutan panjang ini disebut kontraksi panjang.

Peristiwa penyusutan panjang kalipertama diprakirakan oleh *Hendrik Anton Lorentz* seorang pakar fisika asal Belanda, untuk menerangkan hasil nol pada percobaan Michelson-Morley. Oleh karena itu, peristiwa penyusutan ini disebut juga *kontraksi Lorentz*.

Contoh Soal 7.3

Seorang astronot yang tingginya 2 m, berbaring sejajar dengan sumbu pesawat angkasa yang bergerak dengan kelajuan $0,9c$ relatif terhadap bumi. Berapakah tinggi astronot jika diukur oleh pengamat di bumi?

Jawab:

Jika pesawat bergerak terhadap bumi. Kita dapat menetapkan bumi sebagai kerangka acuan diam.

$$L_0 = 2 \text{ m}$$

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$L = 2 \sqrt{1 - \frac{(0,9c)^2}{c^2}}$$

$$L = 0,87 \text{ m}$$

Jadi, tinggi astronot diukur oleh pengamat di bumi adalah 0,87 m.

Uji Kemampuan 7.4

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

- Menurut orang yang berada di dalam pesawat antariksa, panjang pesawat adalah 100 cm. Jika pesawat tersebut melintasi Bumi dengan laju $0,8c$, tentukan berapa panjang pesawat menurut pengamat di Bumi.
- Jarak antara dua puncak gunung yang berada di Bumi adalah 100 km. Berapakah jarak antara dua puncak gunung ini menurut pengamat yang berada dalam pesawat antariksa yang sedang bergerak dengan kecepatan $0,8c$?
- Sebuah kubus memiliki volume sesungguhnya 125 cm^3 . Tentukan volumenya menurut seorang pengamat yang bergerak dengan kecepatan $0,6c$ relatif terhadap kubus dalam arah yang sejajar dengan salah satu rusuknya.

b. Dilatasi Waktu

Selang waktu Δt_0 antara dua kejadian yang terjadi pada tempat yang sama ($x_2 = x_1$) dalam kerangka acuan S' di-

kur menjadi $\Delta t = t_2 - t_1$. Dari persamaan $t = k \left(t' + \frac{vx'}{c^2} \right)$ selang waktu Δt antara kedua kejadian yang diukur dalam kerangka acuan S adalah:

$$\Delta t = t_2 - t_1$$

$$\Delta t = k \left(t_2 + \frac{vx_2}{c^2} \right) - k \left(t_1 + \frac{vx_1}{c^2} \right)$$

$$\Delta t = k (t_2 - t_1) + \frac{kv}{c^2} (x_2 - x_1)$$

$$\Delta t = k (t_2 - t_1) \text{ sebab } x_2 = x_1 \text{ atau } x_2 - x_1 = 0$$

$$\Delta t = k \Delta t_0 \quad \text{sebab } t_2 - t_1 = \Delta t_0$$

$$\Delta t = k \Delta t_0 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

dengan:

Δt = selang waktu yang dinyatakan oleh jarum jam yang bergerak terhadap kejadian

Δt_0 = selang waktu yang dinyatakan oleh jarum jam yang diam terhadap kejadian

$$k = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} > 1$$

Tetapan transformasi k adalah bilangan yang lebih besar dari 1 sehingga dalam persamaan di atas, Δt selalu lebih besar daripada Δt_0 . Dapatlah kita simpulkan bahwa selang waktu yang diamati oleh jam yang bergerak terhadap kejadian adalah lebih lama daripada selang waktu yang diamati oleh jam yang diam terhadap kejadian ($\Delta t > \Delta t_0$). Peristiwa ini dinamakan dilatasi waktu atau pemuluran waktu.

Contoh Soal 7.4

- Seorang astronot yang diam di bumi memiliki laju denyut jantung 60 detak/menit. Berapa denyut jantung astronot itu ketika ia menumpangi pesawat antariksa yang bergerak dengan kelajuan $0,8 c$, diukur oleh pengamat yang:
 - a. diam dalam pesawat;
 - b. diam di bumi.

Jawab:

Ketika astronot diam di bumi, jam di bumi adalah jam yang diam terhadap kejadian sehingga $\Delta t = 1$ menit/60 detak.

$$v = 0,8 c \Rightarrow \frac{v}{c} = 0,8$$

Kecepatan pesawat

- a. Ketika astronot bersama pesawat maka jam pengamat yang berada dalam pesawat adalah jam yang diam terhadap kejadian $\Delta t = \Delta t_0$

Dengan demikian, laju detak jantung adalah:

$$\Delta t = \Delta t_0 = 60 \text{ detak/menit}$$

- b. Berdasarkan prinsip relativitas, pesawat antariksa yang bergerak terhadap bumi dapat juga kita anggap juga bahwa bumilah yang bergerak terhadap pesawat. Dengan demikian, jam pengamat di bumi yang mengukur laju denyut jantung astronot adalah jam yang bergerak terhadap kejadian. Oleh karena itu, jam pengamat di bumi mengalami pemuluran waktu sehingga berlaku

$$\Delta t = k \Delta t_0 \text{ sebab } k > 1$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,8)^2}} = \frac{1}{0,6} = \frac{10}{6}$$

$$\Delta t = \left(\frac{10}{6}\right) \times 1 \text{ menit/60 detak} = 1 \text{ menit/36 detak}$$

- Dua orang saudara kembar A dan B berusia 40 tahun. A melakukan perjalanan ke suatu bintang dengan kecepatan $v = 0,8 c$. Ketika kembali ke bumi, B berusia 70 tahun. Berapa usia si A?

Jawab:

Menurut B yang ada di bumi, A telah melakukan perjalanan selama 30 tahun, berarti $t = 30$

Menurut A, ia telah melakukan perjalanan selama

$$t_0 = t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 30 \sqrt{1 - \frac{(0,8)^2}{c^2}} = 30 \sqrt{0,36} = 18$$

Maka, usia A adalah $40 + 18 = 58$ tahun

Berarti ia lebih muda 12 tahun

Uji Kemampuan 7.5

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Pengamat di Bumi berhasil mendeteksi sebuah pesawat UFO yang bergerak dengan kelajuan $0,9c$ selama 3 tahun. Berapa jauhkah jarak yang ditempuh pesawat (dalam tahun cahaya) menurut:
 - a. pengamat di Bumi;
 - b. penumpang pesawat;
 - c. berapa lama perjalanan tersebut berlangsung menurut penumpang pesawat.
2. Ardi dan Adi adalah dua orang sahabat yang berada di Bumi. Tepat pada saat Ardi berusia 30 tahun dan Adi berusia 25 tahun, Ardi berangkat ke suatu planet dengan pesawat antariksa berkecepatan $0,6c$. Planet yang dituju memiliki jarak 6 tahun cahaya dari Bumi. Sesaat setelah tiba di planet tujuan, Ardi langsung berangkat kembali ke Bumi dengan kecepatan yang sama. Berapakah usia Ardi dan Di ketika mereka bertemu kembali di Bumi?
1. Seorang pengamat di Bumi melihat dua pesawat angkasa luar A dan B. Pesawat A mendekati Bumi dengan kecepatan $0,8c$, sedangkan pesawat B menjauhi Bumi dengan kecepatan $0,6c$. Berapakah kecepatan:
 - a. A menurut pilot B;
 - b. B menurut pilot A
 - c. A dan B menurut pengamat di Bumi.

5. Massa dan Momentum Relativistik

a. Massa Relativistik

Tiga besaran pokok dalam mekanika adalah panjang, selang waktu, dan massa. Kedua besaran yang pertama telah Anda ketahui sebelumnya sebagai besaran relatif, yaitu besaran yang tergantung pada kerangka acuan untuk mengukurnya. Apakah massa merupakan besaran relatif?

Dengan menggunakan hukum kekekalan momentum pada benda yang bergerak relatif, Einstein dapat menunjukkan bahwa massa suatu benda bertambah jika kelajuannya bertambah, sesuai dengan persamaan sebagai berikut.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = km_0$$

dengan:

m_0 = massa diam benda (massa ketika benda diukur terhadap kerangka acuan yang diam terhadap benda)

m = massa relativistik (diukur terhadap kerangka acuan yang bergerak terhadap benda)

- v = kelajuan relativistik benda
- c = kecepatan cahaya dalam ruang hampa udara = 3×10^8 m/s
- k = tetapan transformasi ($k > 1$)

Contoh Soal 7.5

- Berapakah massa elektron ($m_0 = 9 \times 10^{-31}$ kg) yang memiliki kecepatan $0,99 c$.

Jawab:

Diketahui:

$$v = 0,99 c$$

$$c = 0,98 c$$

sehingga

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{9,1 \times 10^{-31}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$m = \frac{9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}}{\sqrt{1 - \frac{(0,99 c)^2}{c^2}}} = 64 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

Berarti 7 kali lebih besar daripada massa diam elektron.

- Hitung massa sebuah elektron ketika bergerak dengan kelajuan:
 - a. $0,1 c$ dalam CRT sebuah pesawat TV;
 - b. $0,98 c$ dalam suatu akselerator (pemercepat partikel) yang digunakan dalam pengobatan kanker (massa diam elektron = $9,11 \times 10^{-31}$ kg).

Jawab:

a. Kelajuan elektron $v = 0,1 c \Rightarrow \frac{v}{c} = 0,1 = \frac{1}{10}$

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{10}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{99}{100}}} = \sqrt{\frac{100}{99}}$$

massa relativistik ($m > m_0$) sehingga:

$$m = km_0 = \sqrt{\frac{100}{99}} \times (9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}) = 9,16 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

Bahkan untuk kelajuan tinggi ($v = 0,1 c = 3 \times 10^8$ m/s) massa elektron hanya kira-kira $0,5\%$ lebih tinggi dari massanya.

$$\text{b. kelajuan elektron } v = 0,98 c \Rightarrow \frac{v}{c} = 0,98$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,98)^2}} = 5,02$$

$$m = km_0 = 0,52m_0$$

$$m = 5,02(9,11 \times 10^{-31}) = 4,57 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

b. Momentum Relativistik

Anda telah mengetahui bahwa besar momentum suatu benda bermassa m yang sedang bergerak dengan kelajuan v diberikan sebagai

$$p = mv$$

Untuk benda yang bergerak dengan kecepatan relativistik maka momentumnya adalah momentum relativistik.

Besar momentum relativistik p diperoleh dari persamaan $p = mv$ dengan memasukkan m sebagai massa relativistik yaitu $m = km_0$

Jadi, persamaan momentum relativistik sebagai berikut.

$$p = km_0v = \frac{m_0v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

c. Energi Relativistik

Coba Anda tinjau hukum II Newton yang dinyatakan oleh $F = m \cdot a$. Hukum ini menyatakan bahwa apabila Anda memberikan gaya yang sangat besar kepada benda maka diperoleh percepatan yang sangat besar pada benda. Oleh karena itu, menurut hubungan $v = v_0 + at$. Maka, kecepatan juga akan sangat besar. Jika kecepatan benda tidak dibatasi maka kita dapat memperoleh kecepatan benda yang sangat besar (v mendekati tidak berhingga).

Para pakar fisika yang melakukan percobaan untuk memperoleh kecepatan sebesar mungkin ternyata menemukan bahwa kecepatan yang terbesar yang dapat dicapai ialah sebesar $c = 3 \times 10^8$ m/s. Tidak ada kecepatan

yang dapat melebihi c . Dengan demikian, pernyataan bahwa kecepatan dapat mencapai tidak berhingga adalah salah dan ini berarti hukum II Newton $F = m \cdot a$ tidak berlaku untuk benda yang bergerak dengan kelajuan sangat tinggi.

Pada prinsipnya hukum II Newton yang asli berbunyi: gaya adalah laju perubahan momentum

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(mv)}{dt}$$

Untuk kelajuan benda jauh lebih kecil daripada kecepatan cahaya ($v = c$) massa benda dapat dianggap tetap dan persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = m \frac{dv}{dt}$$

Karena $a = \frac{dv}{dt}$ maka $F = m \cdot a$ berasal dari hukum II Newton.

Benda yang bergerak dengan kecepatan relativistik, massa benda adalah relatif atau tidak tetap. Karena itu kita harus kita tuliskan dengan menggunakan persamaan $F = \frac{d(mv)}{dt} = m \frac{dv}{dt}$. Jadi dari persamaan tersebut Newton secara jenius telah mengemukakan hipotesanya jika massa benda berubah (tidak tetap).

Dengan menggabungkan persamaan usaha dalam bentuk integral $W = F ds$ dan gaya $W = \frac{d(mv)}{dt}$ inilah Einstein menurunkan persamaan energi kinetik relativitas. Hasil yang diperoleh Einstein adalah:

$$E_k = mc^2 - m_0c^2$$

Apabila kita perhatikan persamaan di atas tampak bahwa energi merupakan hasil perkalian antara massa dan kuadrat kecepatan mutlak. Jadi, ada kesetaraan antara massa dan energi. Apabila partikel massa m berarti partikel itu memiliki energi sebesar

$$E = mc^2$$

Kesetaraan massa dan energi ini pertama kali dikemukakan oleh Albert Einstein sehingga persamaannya terkenal sebagai hukum kekekalan massa-energi Einstein.

Kedua bentuk perkalian di ruas kanan persamaan $E = mc^2$ menyatakan besaran-besaran energi dengan

Energi diam : $E_0 = m_0c^2$

Energi total : $E = mc^2$

Dengan demikian,

“Energi kinetik sebuah partikel yang bergerak relativistik (mendekati kecepatan cahaya) sama dengan selisih antara energi dengan energi diamnya.”

$$E_k = E - E_0$$

Agar lebih mudah mengingat persamaan atau rumus tersebut, kita menggunakan tetapan transformasi untuk menghitung energi total (E).

$E = mc^2$, karena $m = km_0$, maka

$E = km_0c^2$, karena $E_0 = m_0c^2$, maka

$E = kE_0$

Energi kinetik

$E_k = E - E_0$

$E_k = kE_0 - E_0$, karena $E = kE_0$

$E_k = (k - 1)E_0$

Energi Relativistik

Energi Diam : $E_0 = m_0c^2$

Energi Total : $E = kE_0 = km_0c^2 = mc^2$

Energi Kinetik: $E_k = E_t - E_0 = (k - 1)E_0 = (k - 1)m_0c^2$

Contoh Soal 7.6

Sebuah partikel (massa diam m_0) bergerak sedemikian hingga energi kinetiknya $\frac{1}{4}$ kali energi diamnya. Apabila kecepatan cahaya adalah c , berapa kecepatan partikel tersebut?

Jawab:

Diketahui:

$$\left. \begin{array}{l} E_k = \frac{1}{4} E_0 \\ E_k = (k-1)E_0 \end{array} \right\} \Leftrightarrow k-1 = \frac{1}{4} \Rightarrow k = \frac{5}{4}$$

Kecepatan partikel v dapat dihitung

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{5}{4}$$

Kuadratkan kedua ruas persamaan, kemudian dibalik sehingga diperoleh:

$$1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2 = \frac{16}{25} \Rightarrow \left(\frac{v}{c}\right)^2 = 1 - \frac{16}{25} = \frac{9}{25} \Rightarrow \frac{v}{c} = \frac{3}{5} \Rightarrow v = \frac{3}{5}c = 0,6c$$

d. Hubungan Energi dan Momentum Relativistik

Persamaan energi total relativistik: $E = mc^2$

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Persamaan momentum relativistik:

Mari kita cari persamaan yang menghubungkan energi total E , dengan momentum relativistik p , dengan menghubungkan kedua persamaan di atas dengan cara mengkuadratkan kedua ruas persamaan. Maka, kita akan memperoleh:

$$E^2 = m^2 c^4$$

$$p^2 = \frac{m_0^2 v^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Kalikan kedua ruas persamaan
Maka, kita peroleh:

dengan c^2 .

$$p^2 c^2 = \frac{m_0^2 v^2 c^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Kurangi E^2 dari persamaan $E = mc^2$ dengan $p^2 c^2$ dari $p^2 c^2 = \frac{m_0^2 v^2 c^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Maka, kita peroleh:

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4 - \frac{m_0^2 v^2 c^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$m = km_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad m^2 = \frac{m_0^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ ke}$$

Masukkan nilai dalam persamaan di atas maka diperoleh

$$E^2 - p^2 c^2 = \frac{m^2 c^4}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{m_0^2 v^2 c^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$E^2 - p^2 c^2 = \frac{m^2 c^4 - m_0^2 v^2 c^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$E^2 - p^2 c^2 = \frac{m^2 c^4 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4$$

Susun persamaan di atas sehingga kita peroleh persamaan yang menghubungkan energi total E dengan momentum relativistik p , yaitu

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2 \quad \text{atau} \quad E^2 = (m_0 c^2)^2 + p^2 c^2$$

$$E^2 = E^2 + p^2 c^2$$

e. Hukum Kekekalan Energi Relativistik

Jika sebuah benda dalam keadaan diam (massa diam m_0) membelah secara spontan menjadi dua bagian (massa diam masing-masing m_{01} dan m_{02}) yang bergerak masing-masing dengan kelajuan v_1 dan v_2 maka berlaku hukum kekekalan energi relativistik, yaitu energi relativistik awal sama dengan energi relativistik akhir.

Contoh Soal 7.7

Sebuah benda dalam keadaan diam membelah secara spontan menjadi dua bagian yang bergerak dengan arah berlawanan. Bagian yang bermassa 3 kg bergerak dengan kelajuan 0,8 c dan yang 5,20 kg dengan kelajuan 0,6 c. Tetukanlah massa diam benda semula.

Jawab:

Kita hitung k_1 dan k_2 ,

$$k_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,8)^2}} = \frac{1}{0,6} = \frac{10}{6}$$

$$k_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,6)^2}} = \frac{1}{0,8} = \frac{10}{8}$$

Kita hitung massa diam semula m_0 , dengan menggunakan hukum kekekalan energi relativistik. Energi relativistik awal sama dengan energi diam massa m_0 , yaitu $m_0 c^2$. Energi relativistik akhir adalah jumlah dari energi relativistik (massa diam m_{01}) yaitu $E_1 = k_1 m_{01} c^2 = k_2 m_{02} c^2$

Energi awal = Energi akhir

$$m_0 c^2 = k_1 m_{01} c^2 + k_2 m_{02} c^2 : c^2$$

$$m_0 = k_1 m_{01} + k_2 m_{02}$$

$$m_0 = \left(\frac{10}{6}\right)(3 \text{ kg}) + \left(\frac{10}{8}\right)(5,20 \text{ kg})$$

$$m_0 = 5 \text{ kg} + 6,5 \text{ kg} = 11,5 \text{ kg}$$

Massa diam pada keadaan awal adalah $m_0 = 11,5 \text{ kg}$ dan massa diam pada keadaan akhir adalah $m_{01} + m_{02} = 8,20 \text{ kg}$. Jadi, massa diam tidak kekal.

Uji Kemampuan 7.6

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

- Sebuah benda memiliki massa diam 1 mg. Berapakah massa relativistic benda tersebut pada saat bergerak dengan kelajuan:
 - $0,6c$;
 - $0,8c$;
 - $\frac{1}{2}\sqrt{2}c$;
 - $0,5c$;
 - $\frac{1}{2}\sqrt{3}c$.
- Setiap sekon di Matahari terjadi perubahan 4×10^9 kg materi menjadi energi radiasi. Jika laju cahaya dalam vakum adalah 3×10^8 m/s, tentukan daya yang dipancarkan oleh Matahari.
- Suatu benda yang mula-mula dalam keadaan diam melaok menjadi dua bagian yang masing-masing bermassa diam 1 kg dan bergerak saling menjauhi dengan kelajuan yang sama $0,6c$. Tentukan massa diam benda semula.

Ringkasan

Prinsip Relativitas Galileo dibangun berdasarkan dua postulat berikut:

- waktu adalah besaran mutlak;
- hukum-hukum gerak Newton tidak berubah bentuk (invarian).

Prinsip relativitas Einstein berdasarkan pada postulat berikut :

- kelajuan didalam ruang hampa adalah suatu besaran mutlak;
- hukum-hukum mekanik Newton dan elektromagnetik Maxwell Invarian dalam berbagai kerangka inersial.

Kecepatan relativitas dirumuskan sebagai berikut.

$$v_s = \frac{v_s - v}{1 - \frac{v v_x}{c^2}}$$

Untuk tanda negatif dan posisi bergantung pada kerangka acuan yang ditinjau.

Waktu relativitas dirumuskan sebagai berikut.

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Panjang relativitas dirumuskan sebagai berikut.

$$L' = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Massa relativitas dirumuskan sebagai berikut.

$$m = \frac{m_0}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Energi kinetik relativitas dirumuskan sebagai berikut.

$$E'_k = \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - 1 \right) m_0 c^2$$

Uji Kompetensi Bab 7

A. Pilihlah satu jawaban yang benar

1. Periode suatu pendulum di muka bumi besarnya 3,0 detik. Jika pendulum tersebut diamati oleh seseorang yang bergerak relatif terhadap bumi dengan kecepatan $0,95c$ ($c =$ kecepatan cahaya). Maka, periode pendulum tersebut dalam detik menjadi
 - a. 0,5
 - b. 1,5
 - c. 9,6
 - d. 15
 - e. 300
2. Kerangka acuan inersial merupakan kerangka acuan yang
 - a. berputar pada titik pusatnya
 - b. diam, kemudian bergerak terhadap benda
 - c. bergerak, kemudian diam terhadap benda
 - d. diam atau bergerak dengan kecepatan berubah terhadap benda
 - e. diam atau bergerak dengan kecepatan tetap terhadap benda
3. Perbandingan dilatasi waktu untuk sistem yang bergerak pada kecepatan $0,8c$ ($c =$ cepat rambat cahaya) dengan sistem yang bergerak dengan kecepatan $0,6c$ adalah
 - a. 1 : 2
 - b. $1 : \sqrt{3}$
 - c. $\sqrt{3} : 1$
 - d. 2 : 3
 - e. 3 : 2
4. Percobaan Michelson-Morley dilatar belakangi oleh kepercayaan
 - a. fisikawan terhadap adanya eter
 - b. bahwa laju cahaya tidak terbatas
 - c. bahwa cahaya merupakan gelombang electromagnet
 - d. bahwa cahaya dapat melewati ruang hampa
 - e. bahwa informasi dari pengukuran-pengukuran dilewatkan melalui cahaya
5. Menurut pengamat di sebuah planet ada dua pesawat antariksa yang mendekatnya dari arah yang berlawanan, masing-masing adalah pesawat A yang kecepatannya $0,5c$ dan pesawat B yang kecepatannya $0,4c$ ($c =$ cepat rambat cahaya). Menurut pilot pesawat A besar kecepatan pesawat B adalah
 - a. $010c$
 - b. $0,25c$
 - c. $0,40c$
 - d. $0,75c$
 - e. $0,90c$
6. Percobaan Michelson-Morley menggunakan sifat cahaya, yaitu
 - a. difraksi
 - b. refraksi
 - c. polarisasi
 - d. interferensi
 - e. dispersi
7. Sebuah roket bergerak dengan kecepatan $0,8c$. Jika dilihat oleh pengamat yang diam, panjang roket itu akan menyusut sebesar
 - a. 20%
 - b. 36%
 - c. 40%
 - d. 60%
 - e. 80%
8. Hal-hal berikut ini yang tidak berkaitan dengan postulat prinsip relativitas khusus adalah
 - a. kecepatan cahaya merupakan besaran yang isotropic
 - b. kecepatan cahaya besarnya tetap di dalam ruang hampa
 - c. hukum-hukum elektromagnetik berkaitan erat dengan transformasi Lorentz
 - d. hukum-hukum Newton tak bersesuaian dengan transformasi Lorentz
 - e. hukum-hukum Newton hanya berlaku di dalam kerangka acuan inersial

9. Jika c adalah kelajuan cahaya di udara maka agar massa benda menjadi 125 persennya massa diam, benda harus digerakkan pada kelajuan
- $1,25c$
 - $1c$
 - $0,8c$
 - $0,6c$
 - $0,5c$
10. Ada dua orang bersaudara kembar A dan B. B naik pesawat Enterprise dengan kelajuan sebesar $0,8c$. Kemudian, A dan B bertemu pada suatu kesempatan dalam suatu acara keluarga. Menurut B mereka telah berpisah selama 12 tahun, sementara A mendebatnya tidak percaya. Lama perjalanan tersebut, menurut A adalah
- 8 tahun
 - 10 tahun
 - 12 tahun
 - 15 tahun
 - 20 tahun
11. Jika kelajuan partikel $0,6c$ maka perbandingan massa relativistic partikel itu terhadap massa diamnya adalah
- 5 : 3
 - 25 : 9
 - 5 : 4
 - 25 : 4
 - 8 : 5
12. Pernyataan yang benar menurut teori relativitas Einstein adalah
- massa benda diam lebih kecil daripada massa benda bergerak
 - panjang benda diam lebih panjang daripada panjang benda bergerak
 - gerak pengamat dan gerak sumbernya tidak mempengaruhi cepat rambat cahaya
 - selang waktu dua keadaan yang diamati pengamat bergerak lebih besar dari pengamat diam
 - waktu merupakan besaran yang bersifat mutlak
13. Sebuah electron yang memiliki massa diam m_0 bergerak dengan kecepatan $0,6c$ maka energi kinetiknya adalah
- $0,25 m_0 c^2$
 - $0,36 m_0 c^2$
 - $m_0 c^2$
 - $1,80 m_0 c^2$
 - $2,80 m_0 c^2$
14. Sebuah roket panjang 100 meter dan massa 2 ton, meninggalkan bumi dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Menurut teori relativitas Einstein, dapat dikemukakan oleh orang di bumi adalah
- massa roket < 20 ton, panjang roket > 100 meter
 - massa roket > 20 ton, panjang roket < 100 meter
 - massa roket < 20 ton, panjang roket < 100 meter
 - massa roket > 20 ton, panjang roket > 100 meter
 - massa dan panjang roket tetap
15. Suatu partikel bertenaga rehat E_0 sedang bergerak dengan tenaga kinetik E_k dan kecepatan v sedemikian rupa hingga $v/c = 0,99$. E_k/E_0 untuk partikel besarnya
- 2
 - 4
 - 6,1
 - 9
 - 12,3
16. Sebuah benda dalam keadaan diam panjangnya x_0 , kemudian digerakkan dengan kecepatan v (mendekati kecepatan cahaya). Panjang benda menurut pengamat diam yang berada sejajar arah panjangnya benda adalah
- $x = x_0 \sqrt{1 - \frac{v}{c^2}}$
 - $x = x_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{2c^2}}$
 - $x = x_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$
 - $x = x_0 \sqrt{1 + \frac{v}{c^2}}$
 - $x = x_0 \sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}$

17. Agar energi kinetik benda bernilai 25% energi diamnya dan c adalah kelajuan cahaya dalam ruang hampa maka benda harus bergerak dengan kelajuan
- $\frac{c}{4}$
 - $\frac{c}{2}$
 - $\frac{3c}{5}$
 - $\frac{3c}{4}$
 - $\frac{4c}{5}$
18. Setiap detik di matahari terjadi perubahan 4×10^9 kg materi menjadi energi radiasi. Jika laju cahaya dalam ruang hampa 3×10^{10} cm/s, daya yang dipancarkan oleh matahari adalah
- $3,6 \times 10^{30}$ watt
 - $4,8 \times 10^{27}$ watt
 - $3,6 \times 10^{26}$ watt
 - $1,2 \times 10^{18}$ watt
 - $5,0 \times 10^{10}$ watt
19. Sebuah benda yang berkecepatan $0,6c$ memiliki energi total $(1,5 \times 10^{-3} \text{ gram})c^2$. Jika energi c adalah kecepatan cahaya maka saat benda tersebut berkecepatan $0,8c$, energi total menjadi
- $(2 \times 10^{-3} \text{ gram})c^2$
 - $(1,5 \times 10^{-3} \text{ gram})c^2$
 - $(1,2 \times 10^{-3} \text{ gram})c^2$
 - $(1,13 \times 10^{-3} \text{ gram})c^2$
 - $(9 \times 10^{-4} \text{ gram})c^2$
20. Jika sebuah gugus bintang ditempuh dari bumi menggunakan pesawat berkecepatan tinggi dengan kecepatan $v = 0,99999$, membutuhkan waktu 20 tahun. Jarak gugus bintang tersebut ke bumi adalah
- 20 tahun cahaya
 - 40 tahun cahaya
 - 100 tahun cahaya
 - 4000 tahun cahaya
 - 10.0000 tahun cahaya

B. Soal Uraian

Jawablah pertanyaan-pertanyaan dibawah ini dengan benar.

1. Pengamat A mendapati bahawa dua peristiwa terpisah dalam ruang sejauh 600 m dan dalam waktu selama 8×10^{-7} s. Berapa cepatakah seorang pengamat A' harus bergerak relative terhadap A agar kedua peristiwa itu simultan menurut A'?
2. Sebuah partikel bergerak dengan kelajuan $0,8c$. Jika massa diam partel tersebut m_0 , tentukanlah:
 - a. massa bergerak;
 - b. energi kinetiknya.
3. Berapa cepatakah sebuah pesawat roket harus bergerak agar panjangnya terkontraksi menjadi 99% dari panjang diamnya?
4. Tentukan kelajuan sebuah partikel sehingga energi kinetiknya sama dengan energi diamnya.
5. Pada kelajuan berapakah seorang pengamat harus bergerak melewati Bumi agar Bumi nampak seperti sebuah elips yang sumbu panjangnya enam kali sumbu pendeknya?
6. Sebuah pesawat angkasa (massa diamnya m_0) bergerak sehingga energi kinetiknya dua kali energi diamnya. Jika kecepatan cahaya c , tentukan kecepatan pesawat tersebut.
7. Sebuah atom meluruh habis dalam waktu 2×10^{-6} s. Berapakah waktu peluruhan atom tersebut jika diukur seorang pengamat dalam laboratorium yang terhadapnya atom bergerak dengan laju $0,8c$?
8. Sebuah proton yang massa diamnya $1,7 \times 10^{-27}$ kg bergerak sehingga massa relativistiknya menjadi 1,25 kali massa diamnya. Berapa energi kinetik proton tersebut?
9. Sebuah partikel bermassa m_0 dan bergerak dengan kelajuan $0,6c$ menumbuk dan menempel pada partikel sejenis lainnya yang mula-mula diam. Berapakah massa diam dan kecepatan partikel gabungan ini?
10. Daya yang dipancarkan Matahari ke Bumi $1,5 \times 10^{16}$ W. Barapa massa materi yang diproses di matahari untuk menyinari Bumi dalam satu hari? ($c = 3 \times 10^8$ m/s)



Physics in Action

Muon

Anda pernah mendengar kata muon? Contoh yang menarik dari pemekaran waktu atau penyusutan panjang dapat diamati pada partikel tidak stabil disebut muon. Yang tercipta pada tempat yang tinggi oleh partikel cepat dalam sinar kosmis (sebagian besar proton) yang datang dari angkasa ketika terjadi tumbukan dengan inti atom dalam atmosfer Bumi. Muon bermassa 207 kali massa electron dan dapat beruaraan $+e$ atau $-e$, muon meluruh menjadi elektron atau positron setelah berumur rata-rata sekitar 2×10^{-6} sekon ($2 \mu\text{s}$). Muon dalam sinar kosmis memiliki kelajuan sekitar $2,994 \times 10^8 \text{ m/s}$ ($0,998c$) dan mencapai permukaan laut dalam jumlah besar. Muon dapat menembus tipa 1 cm^2 permukaan bumi rata-rata lebih dari satu kali tiap menit. Akan tetapi, dalam $t_0 = 2 \mu\text{s}$, umur rata-rata muon jarak yang dapat ditempuhnya sebelum meluruh hanya

$$Vt_0 = (2,994 \times 10^8 \text{ m/s})(2 \times 10^{-6} \text{ s}) = 600 \text{ m}$$

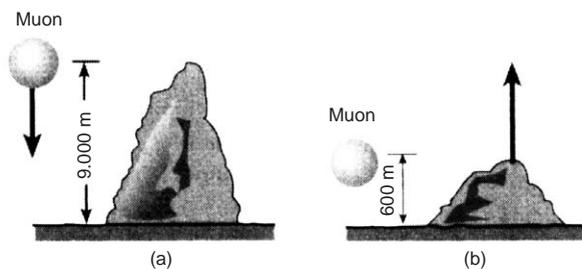
Sedangkan muon tercipta pada ketinggian lebih dari 6000 m. Untuk memecahkan paradoks ini, kita akan memperhatikan umur muon $2 \mu\text{s}$ diperoleh oleh pengamat dalam keadaan diam terhadap muon. Karena muon bergerak ke arah kita dengan kelajuan tinggi $0,998c$, umurnya memanjang terhadap kerangka acuan kita dengan pemekaran waktu menjadi

$$\tau = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2 \times 10^{-6} \text{ s}}{\sqrt{1 - \frac{(0,998c)^2}{c^2}}} = 31,6 \times 10^{-6} \text{ s}$$

Muon yang bergerak memiliki umur 16 kali lebih panjang daripada dalam keadaan diam. Dalam selang waktu $31,6 \mu\text{s}$, sebuah muon yang memiliki kelajuan $0,998c$ dapat menempuh jarak

$$Vt_0 = (2,994 \times 10^8 \text{ m/s})(31,6 \times 10^{-6} \text{ s}) = 9500 \text{ m}$$

Meskipun umur muon hanya $2 \mu\text{s}$ terhadap kerangka acuan pengamat yang diam, namun muon dapat mencapai tanah dari ketinggian 9500 m karena dalam kerangka acuan muon yang bergerak, umur muon adalah $31,6 \mu\text{s}$.



Bab 8

Sumber: Dokumen Pribadi, 2006

Inti Atom dan Radioaktivitas

Peristiwa dijatuhkannya bom atom di Hiroshima dan Nagasaki, merupakan momentum berakhirnya perang dunia ke-2 yang dilakukan Amerika dan sekutunya terhadap Jepang. Namun, dibalik itu semua masih ada yang menyisakan kesedihan yang mendalam terhadap para korban akibat bom atom tersebut. Sampai saat ini, masyarakat umum masih menganggap kurang baik terhadap segala sesuatu yang berkaitan dengan kata “atom” dan “nuklir”. Anggapan negatif ini semakin diperburuk oleh beberapa kecelakaan nuklir yang berdampak sangat dahsyat, seperti kecelakaan nuklir di Chernobyl, Ukraina pada 1986. Padahal, kajian mengenai atom dan teknologi nuklir pun memiliki banyak manfaat dan telah diterapkan dalam banyak bidang, seperti kedokteran dan pertanian.

Contoh pemanfaatan teknologi yang sangat penting bagi kehidupan yaitu sebagai pembangkit listrik. Namun, di sebagian negara terutama di Amerika Serikat saat ini sudah mulai dikurangi pemanfaatan energi nuklir ini untuk pembangkit listrik.

Untuk mendapatkan gambaran lebih jelas mengenai inti atom dan reaksi nuklir, Anda dapat mempelajari dengan seksama dalam bab ini.

Standar Kompetensi

Menunjukkan penerapan konsep fisika inti dan radioaktivitas dalam teknologi dan kehidupan sehari-hari.

Kompetensi Dasar

- Mengidentifikasi karakteristik inti atom dan radioaktivitas.
- Mendeskripsikan pemanfaatan radioaktivitas dalam teknologi dan kehidupan sehari-hari.

- A. Struktur Inti
- B. Radioaktivitas

Kata Kunci

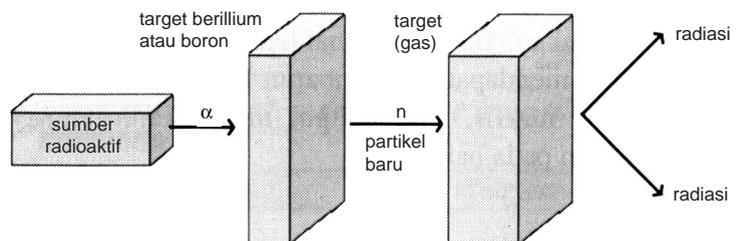
Atom
Radioaktif

A. Struktur Inti

Apakah Anda masih ingat mengenai pembahasan Teori Atom? Pada pembahasan bab mengenai Teori Atom, telah disinggung berbagai hal yang berhubungan dengan inti atom, yang secara tidak langsung merupakan dasar informasi mengenai struktur atom inti. Berikut akan dijelaskan tentang struktur inti, seperti penyusun inti, ukuran inti, bentuk inti, massa inti, dan energi ikat antar-inti.

1. Bagaimana Partikel Penyusun Inti itu?

Sebagaimana Anda ketahui, sebelum tahun 1930-an, teori mengenai atom mengalami perkembangan begitu dahsyat. Setelah elektron dan proton ditemukan oleh para fisikawan, mereka mencoba untuk membuat sebuah hipotesis bahwa inti atom terdiri atas proton yang bermuatan positif. Dengan demikian, diharapkan massa inti umumnya jauh lebih besar daripada massa proton. Ini membuktikan bahwa hipotesis tersebut salah.



Gambar 8.1

Skema Perangkat Eksperimen Chadwick

Neutron diketahui merupakan partikel yang membangun inti. Jadi, inti atom terdiri dari proton dan neutron. Kedua partikel penyusun ini disebut nukleon. Proton bermuatan positif, sedangkan neutron tidak bermuatan listrik. Secara keseluruhan, inti atom bermuatan listrik positif.

Perlu Anda ketahui, jumlah proton yang terkandung dalam inti atom suatu unsur dinyatakan sebagai nomor atom dan ditulis dengan menggunakan lambang Z . Adapun jumlah nukleon dinyatakan sebagai massa atom dan ditulis dengan menggunakan lambang A . Apabila X menyatakan lambang suatu unsur, penulisan lambang unsur lengkap

dengan nomor atom dan nomor massanya adalah sebagai berikut.



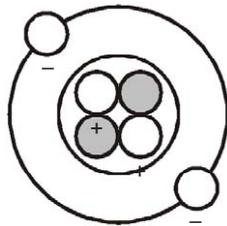
dengan:

X = lambang unsur

Z = nomor atom

A = nomor massa atom

Nomor massa dinotasikan sebagai A suatu unsur adalah bilangan yang menyatakan banyaknya proton dan neutron dalam inti atom tersebut. Adapun nomor atom, dengan notasi Z dari suatu unsur adalah bilangan yang menyatakan banyaknya proton dalam inti atom. Berdasarkan definisi nomor massa dan nomor atom tersebut, jumlah neutron (N) dalam inti dapat ditentukan, yaitu $N = A - Z$.



Gambar 8.2

Inti atom helium yang memiliki jumlah proton-proton jumlah elektron.

Pada dasarnya inti suatu atom mengandung hampir seluruh massa atom. Oleh sebab itu, sifat nuklir suatu atom dapat diketahui dari massa atomik atom tersebut. Massa atomik mengacu pada massa atom netral, bukan pada inti atomnya saja. Jadi, pada massa atomik sudah terkandung massa elektron orbital dan massa ekuivalen energi ikatnya. Massa atomik suatu unsur besarnya tertentu dan dinyatakan dalam satuan massa atom (sma). Satu satuan massa atom (sma) atau *atomic mass unit* (amu) didefinisikan sebagai massa $\frac{1}{12}$ yang nilainya $\frac{1}{12}$ kali massa isotop karbon C-12 (${}^{12}_6\text{C}$). Berarti, massa atom karbon tepat sama dengan 12 sma (satuan massa atom).

Teori atom Dalton antara lain mengatakan bahwa atom-atom suatu unsure identik memiliki bentuk, ukuran, dan massa yang sama ternyata tidak benar. Atom dalam suatu unsur dapat memiliki massa berbeda karena jumlah neutron

Fisikawan Kita



James Chadwick
(1891-1974)

Pada 1932, **James Chadwick** (1891-1974) melakukan sebuah eksperimen penembakan berillium dan boron oleh partikel alfa. Ia memperoleh adanya radiasi yang berdaya tembus tinggi dan dapat menetralkan proton berenergi yang berasal dari zat yang mengandung hidrogen, seperti paraffin. Partikel itu diketahui sebagai partikel yang bermuatan netral. Partikel itu kemudian dinamakan neutron dan memiliki massa yang mendekati massa proton. Massa neutron ternyata 0,08% lebih besar daripada massa atom hidrogen.

Sumber: *Seri Penemu Fisika*, 2004

yang terkandung dalam inti atom berbeda. Unsur-unsur sejenis yang memiliki jumlah neutron berbeda, tetapi jumlah proton sama disebut isotop. Dengan demikian, definisi nomor atom dan nomor massa ini merupakan cara sederhana untuk membedakan isotop-isotop dari suatu unsur yang sama. Isotop-isotop suatu jenis unsur memiliki nomor unsur atom (Z) yang sama, tetapi nomor massanya (A) berbeda. Berikut ini beberapa contoh isotop antara lain.

Isotop hidrogen : ${}^1_1\text{H}$ ${}^2_1\text{H}$ ${}^3_1\text{H}$

Isotop karbon : ${}^{12}_6\text{C}$ ${}^{13}_6\text{C}$ ${}^{14}_6\text{C}$

Isotop oksigen : ${}^{16}_8\text{O}$ ${}^{17}_8\text{O}$ ${}^{18}_8\text{O}$

Isotop khlor : ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ ${}^{37}_{17}\text{Cl}$

Isotop seng : ${}^{65}_{30}\text{Zn}$ ${}^{66}_{30}\text{Zn}$

Isobar adalah unsur-unsur dengan nomor massa sama, tetapi nomor-nomor atom berbeda. Untuk unsur-unsur yang memiliki isotop-isotop, harga massa atom yang digunakan dalam perhitungan umumnya adalah harga massa atom rata-rata dari seluruh isotop-isotop suatu unsur.

2. Bentuk, Ukuran, dan Gaya Inti

Bentuk inti digambarkan dapat berbagai macam, seperti pada atom hidrogen (H), Oksigen (O), kalsium (Ca), nikel (Ni), dan lain sebagainya. Pada umumnya, bentuk inti bulat, seperti bola *rugby*.

Coba masih ingatkah Anda proses hamburan partikel α yang teramati oleh Rutherford pada pembahasan mengenai Teori Atom. Hasil dari pengamatannya diperoleh bahwa ketika partikel α mendekati pusat atom hingga jarak 10^{-12} cm, partikel α akan mengalami pengaruh gaya coulomb oleh inti yang bermuatan positif. Partikel α tersebut akan mendapat gaya tolak. Akan tetapi, apabila partikel α dapat mendekati inti pada jarak sekitar 10^{-13} cm, gaya tolak tersebut hilang dan partikel α tertarik ke dalam inti yang bermuatan positif dan membentuk inti gabungan. Gejala inilah yang dapat digunakan sebagai dasar pertama untuk menentukan ukuran inti.

Setelah penemuan neutron oleh Chadwick, hamburan partikel α diganti dengan hamburan partikel neutron. Sebab neutron tidak bermuatan, neutron tidak mendapatkan gaya tolak coulomb oleh inti sehingga neutron dapat lebih mendekati inti. Selain dapat diserap inti, neutron juga dapat mengalami hamburan, artinya neutron tersebut dapat dipantulkan atau dibelokkan.

Dengan dasar mengetahui besarnya sudut hamburan neutron oleh inti dari suatu unsur, para pakar fisika inti memperoleh suatu kesimpulan bahwa ukuran suatu inti bergantung pada banyaknya partikel penyusun inti. Dengan menganggap inti berbentuk bola maka secara matematis ukuran jari-jari inti dapat dibuat persamaannya sebagai berikut.

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}}$$

dengan:

R = jari-jari atom suatu unsur

R_0 = suatu konstanta yang nilainya $1,2 \times 10^{-13}$ cm

A = nomor massa

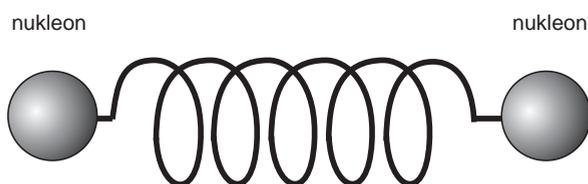
Mengapa proton-proton yang bermuatan sama (positif) dapat berkumpul dalam suatu inti atom dan bukannya tolak-menolak sehingga bercerai-berai? Bersatunya proton dalam inti disebabkan adanya suatu gaya inti yang mengikat proton-proton yang sama-sama bermuatan positif. Sifat –sifat gaya inti, antara lain:

1. dapat dinyatakan dengan suatu interaksi antara dua benda yang dinyatakan dengan suatu potensial;
2. bekerja pada jangkauan pendek (10^{-13} cm atau 1 fermi);
3. merupakan gaya yang mempertahankan kestabilan suatu inti;
4. merupakan jenis gaya terkuat di antara gaya-gaya yang ada, seperti gaya Coulomb dan gaya gravitasi.

Selain gaya inti, ada lagi jenis gaya yang lain terdapat dalam inti atom. Anda telah mengetahui bahwa apabila ada dua muatan listrik sejenis, keduanya akan menimbulkan gaya tolak-menolak disebut gaya Coulomb. Demikian juga apabila dua benda bermassa sama akan menimbulkan gaya

gravitasi yang saling menarik. Jadi, pada inti atom bekerja tiga jenis gaya, antara lain gaya inti, gaya Coulomb, dan gaya gravitasi. Gaya inti merupakan gaya yang terkuat. Gaya inti hingga kini masih belum dapat dimengerti dengan jelas oleh para pakar dibandingkan dengan konsep gaya elektromagnetik. Akan tetapi, akhir-akhir ini kemajuan pengkajian mengenai inti atom cukup pesat, terutama menerangkan aspek-aspek penting dari sifat dan kelakuan nuklir.

Gaya inti dapat digambarkan sebagai dua bola yang satu sama lain dihubungkan dengan pegas. Coba perhatikan gambar berikut.



Gambar 8.3
Gaya inti yang digambarkan sebagai dua bola yang dihubungkan dengan pegas.

Apabila terlalu dekat akan saling menolak dan jika jauh, akan saling menarik. Itulah sifat gaya inti.

3. Bentuk, Ukuran, dan Gaya Inti

Satuan massa atom tidak menggunakan kilogram atau gram, melainkan menggunakan satuan massa atom. Satuan

massa atom didefinisikan sebagai $\frac{1}{12}$ kali massa satu karbon $^{12}_6\text{C}$, yaitu:

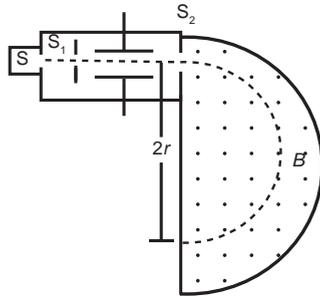
$$\begin{aligned} 1 \text{ sma} &= \frac{1}{12} \times \text{massa satu atom } ^{12}_6\text{C} \\ &= 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned}$$

Kita akan memperoleh massa proton, neutron, dan elektron adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{massa proton} &= 1,6726 \times 10^{-27} \text{ kg} &= 1,00728 \text{ sma} \\ \text{massa neutron} &= 1,6749 \times 10^{-27} \text{ kg} &= 1,00866 \text{ sma} \\ \text{massa elektron} &= 0,000911 \times 10^{-27} \text{ kg} &= 0,000549 \text{ sma} \end{aligned}$$

Dua atom yang berasal dari suatu unsur dapat berbeda massanya, walaupun sifat-sifat kimianya sama karena

memiliki jumlah elektron yang sama. Oleh karena jumlah elektron kedua atom itu sama, jumlah proton kedua intinya sama. Jadi, perbedaan massa disebabkan oleh adanya perbedaan jumlah neutron dalam inti.



Gambar 8.4

Bagian proses pengukuran massa partikel menggunakan spektrometer massa.

Bagaimana cara mengukur massa berbagai isotop? Dengan cara teknik spektrometer massa, Anda dapat mengukur massa berbagai jenis isotop. Adapun teknik prosesnya sebagai berikut.

Partikel-partikel yang akan keluar diukur massanya, dipercepat melalui medan magnetik B dan medan listrik E sehingga memiliki kecepatan v . Kemudian, partikel-partikel tersebut dilewatkan pada medan magnetik homogen B yang arahnya tegak lurus v sehingga lintasan partikel berubah membentuk lingkaran dengan jari-jari R . Jika muatan partikelnya q , partikel itu akan mengalami gaya Lorentz yang juga bertindak sebagai gaya sentripetal.

Persamaan gaya Lorentz : $F_L = qvB$

$$F_{sp} = m \frac{v^2}{R}$$

Persamaan gaya sentripetal :

Karena gaya Lorentz bertindak pula sebagai gaya sentripetal. Maka, persamaannya menjadi:

$$qvB = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow m = \frac{qBR}{v}$$

Sebuah atom yang stabil atau netral selalu memiliki massa lebih kecil daripada jumlah massa partikel pembentuk atom tersebut. Atom deuterium (${}^2_1\text{H}$) merupakan salah satu isotop atom hydrogen. Atom ini memiliki massa 2,01410 sma. Adapun massa atom hydrogen (${}^1_1\text{H}$) ditambah massa neutron adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 m_{\text{hidrogen}} + m_{\text{neutron}} &= 1,00728 \text{ sma} + 1,00866 \text{ sma} \\
 &= 2,01594 \text{ sma}
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan di atas, kita dapat melihat perbedaan massa sebesar $2,01594 \text{ sma} - 2,01410 \text{ sma} = 0,00184 \text{ sma}$. Oleh sebab inti deuterium yang disebut deuteron terdiri atas hydrogen (${}^1_1\text{H}$) dan neutron, keduanya yaitu ${}^1_1\text{H}$ dan ${}^1_0\text{n}$ memiliki elektron orbital tunggal. Jadi, perbedaan massa sebesar $0,00184 \text{ sma}$ berhubungan dengan terbentuknya ikatan proton dan neutron menjadi deuteron. Perubahan massa ini disebut defek massa.

Defek massa pada pembentukan nuklida ${}^A_Z\text{X}$ adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 D_m &= (Zm_p + (A - Z)m_n + Zm_e - m_{{}_Z^A\text{X}}) \\
 &\text{atau} \\
 \Delta m &= (Zm_p + (A - Z)m_n + Zm_e - m_{{}_Z^A\text{X}})
 \end{aligned}$$

Keterangan:

- m_p = 1,00783 sma
- m_n = 1,00866 sma
- A = nomor massa
- Z = nomor atom
- $m_{{}_Z^A\text{X}}$ = massa atom

Tabel 8.1 Simbol dan massa atom

Nama	Simbol	Massa
Neutron	${}^1_0\text{n}$	1,00866
Proton	${}^1_1\text{p}$	1,00783
Deuterium	${}^2_1\text{H}$	2,01410
Tritium	${}^3_1\text{H}$	3,01604
Helium-3	${}^3_2\text{He}$	3,01602
Helium-4	${}^4_2\text{He}$	4,002260
Alfa	${}^4_2\alpha$	4,0026
Lithium-6	${}^6_3\text{Li}$	6,0151

Lithium-7	${}^7_3\text{Li}$	7,0160
Berillium-8	${}^8_4\text{Be}$	8,0050
Berillium-9	${}^9_4\text{Be}$	9,0121
Boron-10	${}^{10}_5\text{B}$	10,0129
Boron-11	${}^{11}_5\text{B}$	11,0093
Carbon-12	${}^{12}_6\text{C}$	12,0000
Carbon-13	${}^{13}_6\text{C}$	13,0033
Carbon-14	${}^{14}_6\text{C}$	14,0030
Catatan:Elektron	${}^0_1\text{e}$	0,000549

Defek massa sebuah atom tidak hilang begitu saja, melainkan massa inilah yang akan menjadi energi ikat inti yang berfungsi mengikat nukleon-nukleon dalam inti.

Energi ikat inti adalah karakteristik penting suatu inti yang menentukan kestabilan inti tersebut. Energi ini merupakan pengikat nukleon-nukleon sehingga nukleon-nukleon termampatkan dalam bentuk inti atom. Energi ikat inti adalah energi yang digunakan oleh massa sebagian nukleon ketika nukleon-nukleon tersusun membentuk inti atom.

Konversi sebagian massa inti menjadi energi ikat merupakan ilustrasi dari teori Einstein tentang konversi materi menjadi energi yang dikemukakan pada 1905 dalam bentuk persamaan sebagai berikut.

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

dengan:

ΔE = energi ikat inti (J)

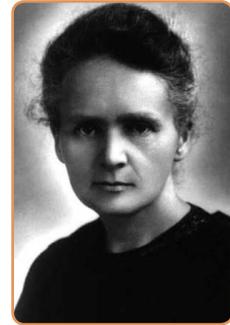
c = kecepatan cahaya (m/s)

Δm = defek massa (kg)

Apabila perubahan massa pada proses pembentukan inti sebesar 1 sma, nilai energi dari perubahan massa tersebut dapat diperoleh dari perhitungan sebagai berikut.

$$E = (1 \text{ sma}) (1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg sma}^{-1}) (2,998 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

Fisikawan Kita



Marie Skłodowska Curie

Marie Curie, atau Nona Skłodowska semasa gadisnya, lahir di Warsawa, pada 7 November 1867 dan anak seorang guru sekolah tingkat dua. Ia memperoleh pendidikan umum di sekolah-sekolah lokal dan sekedar latihan ilmiah dari ayahnya. Ia kemudian terlibat dalam sebuah organisasi revolusioner pelajar dan ini mendorong dirinya untuk meninggalkan Warsawa, kemudian pindah ke Polandia yang dikuasai Rusia, kemudian ke Cracow, yang pada saat yang sama berada di bawah kekuasaan Austria. Pada 1891, ia pergi ke Paris untuk melanjutkan pendidikannya ke jenjang sarjana muda dan doktor di bidang Ilmu Fisika dan Matematika. Di sana, ia bertemu Pierre Curie, seorang Profesor di Sekolah Fisika tahun 1894, dan tahun berikutnya mereka pun menikah. Ia menggantikan suaminya sebagai Ketua Laboratorium Fisika di Sarbonne, memperoleh gelar Doktor Sains pada 1903.

Sumber: *Seri Tokoh Fisika*, 2004

$$E = 1,4925 \times 10^{-10} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$$

$$E = 1,4925 \times 10^{-10} \text{ joule}$$

$$E = \frac{1,4925 \times 10^{-10}}{1,6605 \times 10^{-19}} \text{ eV} = 931,5 \text{ MeV}$$

Dengan demikian, massa 1 sma ekuivalen dengan energi 931,5 MeV. Maka, akan diperoleh

$$\Delta E = \Delta m \times 931,5 \text{ MeV}$$

dengan Δm dalam satuan sma. Untuk ${}^A_Z X$, energi ikat pada saat pembentukan adalah sebagai berikut.

$$\Delta E = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{{}^A_Z X}] 931,5 \text{ MeV}$$

dengan:

ΔE = energi ikat inti (MeV)

m_p = massa proton (sma)

m_n = massa neutron (sma)

m_e = massa elektron (sma)

Z, A = nomor atom dan nomor massa atom X

$m_{{}^A_Z X}$ = massa inti atom

Energi ikat inti belum menggambarkan kestabilan suatu nuklida. Perkiraan tentang kestabilan inti dapat dilakukan

Contoh Soal 8.1

Massa isotop ${}^7_3\text{Li}$ adalah 7,018 sma. Hitung energi ikat per nukleon.

(massa H = 1,008 sma, massa neutron = 1,009 sma, dan 1 sma = 931 MeV)

Jawab:

${}^7_3\text{Li} \rightarrow$ artinya nomor atom $Z = 3$
nomor massa $A = 7$

Kita hitung dahulu energi ikat total dengan persamaan defek massa, tetapi 931,5 MeV kita ubah menjadi 931 MeV (sesuai dengan data yang diketahui dalam tabel).

$$\Delta E = [Zm_H + (A - Z)m_n - m_{{}^7_3\text{Li}}] 931 \text{ MeV}$$

$$\Delta E = [3(1,008) + (7 - 3)(1,009) - (7,018)] 931 \text{ MeV}$$

$$\Delta E = 0,042(931 \text{ MeV}) = 39,102 \text{ MeV}$$

Uji Kemampuan 8.1

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Apakah yang dimaksud dengan isotop? Coba Anda jelaskan dengan kata-kata Anda sendiri.
2. Tentukan jumlah proton, neutron, dan elektron pada:
 - a. atom ${}^9_4\text{Be}$
 - b. ion ${}^9_4\text{Be}^{2+}$
 - c. ion ${}^9_4\text{Be}^{2-}$
1. Massa atom ${}^4_2\text{He}$ adalah 4,00260 sma. Jika massa proton = 1,00783 sma dan massa neutron = 1,00860 sma, tentukan:
 - a. defek massa dari inti He;
 - b. besarnya energi ikat He.
2. Diketahui massa atom karbon C^{12} adalah 12,01100 sma, massa proton = 1,00783 sma, dan massa neutron = 1,00866 sma, tentukan energi ikat per nukleonnya.

dengan memperhatikan harag energi ikat rata-rata per nukleon. Energi ikat rata-rata (\overline{E}) per nukleon adalah sebagai berikut.

$$E = \frac{\text{energi ikat } (\Delta E)}{\text{nomor massa } (A)}$$

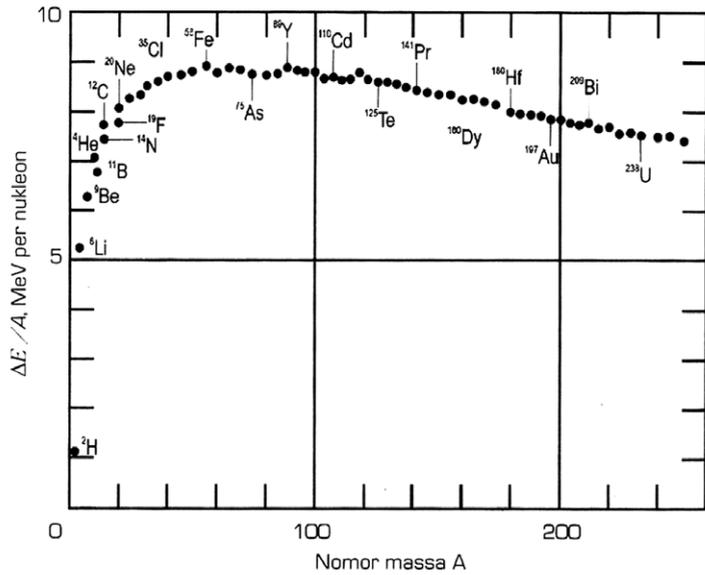
Contoh energi rata-rata per nukleon adalah sebagai berikut.

Energi ikat per nukleon pada contoh soal di atas adalah

$$\text{Untuk } {}^7_3\text{Li} \Rightarrow \frac{\Delta E}{A} = \frac{39,102 \text{ MeV}}{12 \text{ nukleon}} = 5,586 \text{ MeV}$$

Anda telah mengetahui bahwa energi ikat inti timbul akibat selisih massa antara jumlah massa antara jumlah massa nukleon-nukleonnya dengan massa inti stabilnya. Jadi, untuk memisahkan nukleon-nukleon dalam inti kita perlu memberikan energi ikat minimal sebesar energi ikatnya. Jika energi ikat total kita bagi dengan banyaknya nukleon yang dikandung sebuah atom maka kita peroleh energi

$\frac{\Delta E}{A}$ per nukleon (A). Kita dapat melakukan perhitungan $\frac{\Delta E}{A}$ untuk berbagai atom. Coba Anda perhatikan gambar berikut ini.



Gambar 8.5

Grafik energi ikat per nukleon terhadap nomor massa berbagai inti.

Gambar di atas menunjukkan grafik hubungan antara energi ikat per nucleon terhadap nomor massa inti untuk berbagai atom. Tampak inti ^{56}Fe relatif lebih kuat daripada inti ^{238}U . Ini karena energi ikat inti per nucleon untuk ^{56}Fe relatif lebih besar daripada untuk ^{238}U . Dengan kata lain, grafik di atas menunjukkan bahwa ketika proton-proton dan neutron-neutron bersatu membentuk inti ^{56}Fe dibebaskan lebih banyak energi daripada untuk membentuk inti ^{238}U .

Energi ikat per nukleon mulai dari nilai kecil (0 untuk proton dan neutron 1,11 MeV untuk deuterium), naik ke suatu nilai maksimum 8,795 MeV untuk ^{62}Ni dan kemudian turun ke nilai 7,5 MeV untuk inti berat.

Bentuk grafik di atas terutama ditentukan oleh tiga factor, antara lain:

- 1) lengkungan yang hampir lurus, terbentuk karena nukleon-nukleon berinteraksi hanya dengan tetangga-tetangga terdekatnya;
- 2) lengkungan yang berkurang tajam untuk inti ringan, terbentuk karena inti ringan secara relatif memiliki nukleon-nukleon yang lebih datar dan karena itu hanya memiliki tetangga-tetangga terdekat yang lebih sedikit daripada inti berat;

- 3) lengkungan yang berkurang secara berangsur untuk inti berat adalah berhubungan dengan gaya tolak-menolak Coulomb antara proton-proton.

Gambar di atas juga menggambarkan bahwa kita dapat melepaskan energi dari inti dengan dua cara. Jika kita memisahkan suatu inti berat menjadi dua inti yang lebih ringan, energi akan dibebaskan. Karena energi ikat per nucleon lebih besar untuk dua inti lebih ringan daripada untuk inti induk yang berat. Proses ini dikenal sebagai reaksi fisi. Pilihan lain adalah kita dapat menggabungkan dua inti ringan menjadi sebuah inti yang lebih berat; sekali lagi energi dibebaskan jika energi ikat per nucleon lebih besar untuk inti berat yang dibentuk daripada untuk kedua inti ringan. Proses ini dikenal sebagai reaksi fusi. Kita akan membahas reaksi fisi dan fusi dalam subbab selanjutnya.

Uji Kemampuan 8.2

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Inti atom terdiri atas nukleon-nukleon. Mengapa nucleon-nukleon yang sama-sama bermuatan dapat bergabung sebagai pembentuk inti atom?
2. Tentukan jari-jari atom karbon ^{12}C dalam satuan Fermi jika diketahui konstanta $R_0 = 1,2 \times 10^{-13}$ cm.
3. Tentukan energi yang dapat dihasilkan jika 1 gram massa seluruhnya berubah menjadi energi.
4. Tentukan besarnya energi ikat per nukleon dari sebuah atom $^{16}_8\text{O}$ yang memiliki massa 15,99491 sma.

B. Radioaktivitas

1. Penemuan Sinar-Sinar Radioaktif

Radioaktivitas alamiah kali pertama ditemukan oleh **Henri Bacquerel (1852-1908)** pada 1896. Selanjutnya, radioaktivitas didefinisikan sebagai pemancaran radioaktif secara spontan oleh inti-inti tidak stabil (misalnya inti uranium) menjadi inti-inti yang lebih stabil. Inti yang memancarkan sinar radiokatif disebut *inti induk*, sedangkan inti baru yang terjadi disebut *inti anak*.

Pada awalnya, Becquerel menduga bahwa uranium menyimpan energi matahari yang diperoleh sebelumnya. Agar dapat membuktikannya, ia menempatkan senyawa uranium dalam kotak timah yang tertutup rapat dan menyimpan untuk beberapa lama di tempat yang tidak terkena sinar matahari. Ternyata, uranium tersebut tetap menunjukkan gejala radiasi, yaitu mampu menghitamkan pelat foto.



Gambar 8.6

Marie Curie (1867-1934)

Sumber: *Seri Tokoh Fisika*, 2004

Dari hasil eksperimennya, Becquerel berkesimpulan bahwa senyawa-senyawa uranium dapat menghasilkan sinar yang memiliki sifat hampir sama dengan sifat sinar-X, yaitu memiliki daya tembus besar dan dapat menghitamkan pelat film. Karena gejala ini merupakan peristiwa baru, sinar yang dipancarkan senyawa uranium ini disebut sinar Becquerel. Peristiwa ini cukup menarik perhatian para pakar sains saat itu, untuk menyelidiki sifat-sifat sinar ini dan penyebab senyawa uranium dapat menghasilkan sinar Becquerel.

Dua tahun kemudian, yaitu pada 1898, suami istri **Piere Curie (1859-1906)** dari Prancis dan **Marie Curie (1867-1934)** dari Polandia berhasil membuktikan bahwa sinar Becquerel berasal dari atom uranium, bukan senyawanya. Dalam eksperimennya, mereka juga menemukan bahwa polonium dan radium pun menghasilkan sinar Becquerel dengan intensitas yang lebih kuat. Kemudian, para ahli memutuskan bahwa unsure yang memancarkan radiasi dari dirinya sendiri disebut **unsur radioaktif**. Adapun sinar atau partikel yang dipancarkan oleh unsur radioaktif disebut **sinar radioaktif**.



Gambar 8.7

Unsur Uranium yang dipadatkan

Sumber: *CD Encharta*, 2005

2. Sinar-sinar Radioaktif

Unsur radioaktif yang sudah ada di alam, seperti uranium, polonium, dan radium disebut radioaktif alam. Dari eksperimen-eksperimen lebih lanjut, diketahui bahwa unsur-unsur radioaktif alam pada umumnya terdiri atas unsure-unsur berat yang memiliki nomor atom lebih besar daripada 83. Hanya ada beberapa unsur radioaktif alam yang memiliki nomor atom lebih kecil daripada 83. Saat ini, banyak sekali lembaga-lembaga dalam bidang penelitian radioaktif sudah membuat unsur radioaktif baik dari unsur

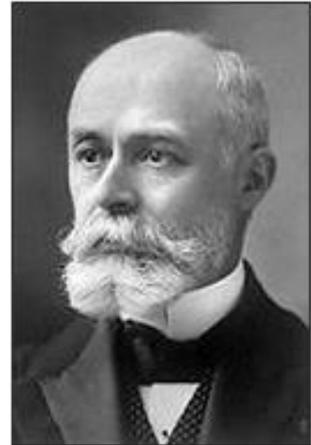
besar maupun unsur ringan yang disebut unsur radioaktif buatan.

Pada 1899, **Henry Becquerel** mengamati bahwa salah satu sinar yang dipancarkan oleh unsur radioaktif dapat dibelokkan oleh medan magnetik yang arahnya sama dengan arah pembelokan sinar katode. Gejala ini menunjukkan bahwa salah satu sinar yang dipancarkan oleh unsure radioaktif mengandung partikel-partikel bermuatan negatif. Hasil pengukuran menunjukkan partikel negatif ini sama dengan elektron yang kemudian disebut sinar beta (β). Selanjutnya, diketahui bahwa sinar β memiliki daya tembus yang cukup besar sehingga dapat menembus lempengan aluminium yang memiliki ketebalan kurang dari 5 mm dan lempengan timbal (Pb) yang ketebalannya kurang dari 1 mm.

Pada 1900, Rutherford menemukan fakta bahwa selain dapat memancarkan partikel yang bermuatan negatif (sinar β), unsur radioaktif juga dapat memancarkan partikel yang bermuatan positif. Partikel ini dibelokkan berlawanan arah dengan arah pembelokkan sinar beta dalam medan magnetik. Partikel ini memiliki daya tembus yang lebih kecil daripada daya tembus sinar beta. Partikel ini mampu menembus lempengan aluminium yang memiliki ketebalan kurang dari 0,1 mm. Hasil penelitian yang lebih mendalam, diperoleh bahwa partikel radioaktif ini sama dengan inti atom helium (${}^4_2\text{He}$) sehingga dapat dipastikan bahwa partikel tersebut bernomor atom dua dan nomor massa empat, yang akhirnya diberi nama partikel alfa (α).

Selain menghasilkan partikel beta (sinar β) dan partikel alfa (sinar α), unsure radioaktif juga memancarkan sinar yang tidak dibelokkan oleh medan magnetik. Sinar ini tidak bermuatan listrik dan memiliki frekuensi lebih besar daripada frekuensi sinar-X serta memiliki daya tembus yang sangat kuat. Rutherford menamakannya dengan sinar gamma (γ). Dan ternyata, sinar ini merupakan gelombang elektromagnetik.

Ada tiga jenis sinar radioaktif yang dapat dipancarkan oleh inti tidak stabil, yaitu sinar alfa (α), sinar (β), dan sinar gamma (γ). Apabila ketiga sinar radioaktif tersebut dilewatkan sehingga memotong medan magnetik yang

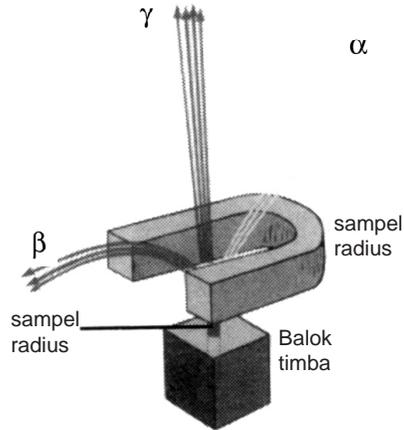


Gambar 8.8

Henri Bacquerel (1852-1908)

Sumber: CD Encharta, 2005

arahnya masuk tegak lurus bidang kertas (x), kemudian setiap sinar dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 8.9

Sinar α dan sinar β dibelokkan medan magnetik, tetapi sinar γ tidak dibelokkan.

a. Sinar Alfa (${}^4_2\hat{a}$)

Ciri-ciri sinar alfa, yaitu sebagai berikut.

- 1) Identik dengan inti helium (${}^4_2\hat{a}$), memiliki 2 proton dan 2 neutron sehingga bermuatan positif.
- 2) Dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnetik.
- 3) Daya tembusnya lebih kecil daripada sinar β dan sinar γ .
- 4) Daya ionisasi lebih besar daripada sinar β dan sinar γ .

b. Sinar Beta (${}^0_{-1}\hat{a}$)

Ciri-ciri sinar beta, yaitu sebagai berikut.

- 1) Merupakan pancaran elektron (${}^0_{-1}\hat{a}$) berenergi tinggi dan bermuatan negative.
- 2) Dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnetik.
- 3) Daya tembusnya lebih besar daripada sinar α .
- 4) Daya ionisasinya lebihkecil daripada daya ionisasi sinar α .

c. Sinar Beta (${}^0_0\tilde{a}$)

Ciri-ciri sinar alfa, yaitu sebagai berikut.

- 1) Indentik dengan inti helium (${}^4_2\hat{a}$), memiliki 2 proton dan 2 neutron sehingga bermuatan positif.

- 2) Dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnetik.
- 3) Daya tembusnya lebih kecil daripada sinar β dan sinar γ .
- 4) Daya ionisasi lebih besar daripada sinar β dan sinar γ .

d. Sinar Beta (${}_{-1}^0\hat{a}$)

Ciri-ciri sinar beta, yaitu sebagai berikut.

- 1) Merupakan radiasi gelombang elektromagnetik yang memiliki daya tembus paling besar di antara sinar-sinar radioaktif yang lain.
- 2) Tidak bermuatan sehingga tidak dibelokkan oleh medan listrik dan medan magnetik.
- 3) Daya tembus paling besar.
- 4) Daya ionisasi paling kecil.

Tabel 8.2 Sifat-sifat partikel α , β , dan γ

Partikel	Identik dengan	Muatan	Massa (sma)	Perbandingan Daya Tembus	Bahan yang Dapat Ditemukan	Dalam Medan Magnetik dan Medan Listrik
Alfa (α)	Inti helium	+2	4,0026	1	Selembar kertas	Dibelokkan
Beta (β)	Electron berkecepatan tinggi	-1	$\frac{1}{1.084}$	100	Kayu/aluminium setebal 5 mm	Dibelokkan dengan kuat
Gamma (γ)	Radiasi gelombang elektromagnetik frekuensi tinggi	0	0	1.000	Timbal setebal 3 cm	Tidak dibelokkan

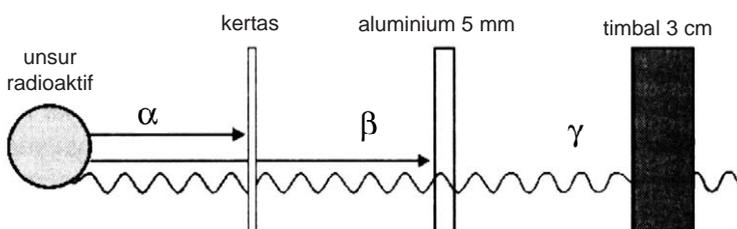
Uji Kemampuan 8.3

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Dapatkah Anda menjelaskan mengapa unsur-unsur radioaktif alam pada umumnya terdiri atas unsur-unsur berat.
2. Jelaskan apa yang dimaksud dengan:
 - a. radioaktivitas;
 - b. sinar radioaktif.

3. Jika sinar-sinar radioaktif α , β , dan γ dilewatkan pada medan magnetik akan terjadi penyimpangan arah rambat sinar radioaktif tersebut. Dapatkah Anda menghasilkan terjadinya penyimpangan tersebut? Coba Anda gambarkan arah penyimpangannya.
4. Jelaskan kemampuan:
 - a. daya tembus;
 - b. daya ionisasi
 dari sinar radioaktif α , β , dan γ .

Sifat-sifat Partikel α , β , dan γ



Gambar 8.10

Daya tembus sinar-sinar radioaktif.

Radiasi yang akan dipancarkan sinar radioaktif berasal dari inti atom yang secara spontan memancarkan partikel-partikel atau sinar. Inti atom yang dapat memancarkan partikel-partikel atau sinar radioaktif adalah inti yang tidak stabil. Jadi, partikel atom sinar radioaktif terjadi karena ketidakstabilan inti.

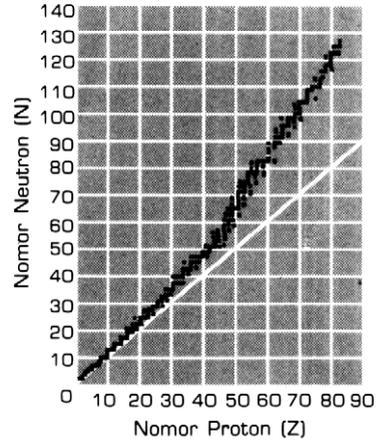
Perlu Anda ketahui bahwa ketidakstabilan inti tidak dapat diramalkan dengan suatu aturan. Akan tetapi, dengan menggunakan beberapa data empiris dari hasil pengamatan dapat digunakan untuk mengetahui suatu inti radioaktif. Data empiris ketidakstabilan inti di antaranya, yaitu sebagai berikut.

- a. Pada umumnya, inti yang memiliki nomor atom lebih besar daripada 83 atau jumlah proton lebih besar daripada 83 cenderung merupakan inti yang tidak stabil.
- b. Inti yang jumlah nukleonnya genap lebih stabil daripada dengan inti yang jumlah nukleonnya ganjil.
- c. Kestabilan inti juga ditentukan oleh perbandingan jumlah neutron (N) dan jumlah proton (Z) di dalam inti. Untuk unsure-unsur ringan, perbandingan jumlah neutron (N) dengan jumlah proton (Z), $N/Z = 1$ merupakan inti stabil.

Setiap inti atom akan cenderung berada pada keadaan stabil. Kenyataannya unsur-unsur yang terbanyak di permukaan bumi adalah $^{16}_8\text{O}$ dan $^{28}_{14}\text{Si}$ mendorong para pakar untuk menduga bahwa inti atom yang stabil adalah inti atom yang memiliki jumlah proton yang sama dengan jumlah neutronnya.

Kestabilan inti atom dapat diukur dari perbandingan jumlah neutron terhadap jumlah proton. Coba Anda lihat gambar di atas menunjukkan grafik perbandingan jumlah neutron terhadap jumlah proton. Grafik ini disebut *pita kestabilan inti*.

Inti yang tidak stabil memiliki nilai perbandingan neutron dan proton (N/Z) di luar nilai yang ditunjukkan oleh pita kestabilan inti, yaitu di atas pita kestabilan, di bawah pita kestabilan, dan yang memiliki nomor atom lebih besar daripada 83 ($Z > 83$).

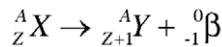


Gambar 8.11

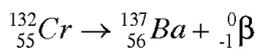
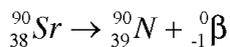
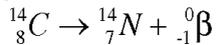
Diagram Kestabilan Inti (Diagram N-Z)

1) Inti di Atas Pita Kestabilan

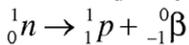
Unsur-unsur yang terletak di atas pita kestabilan memiliki harga N/Z besar sehingga unsur tersebut berusaha untuk mengurangi jumlah neutronnya. Hal ini dapat dilakukan dengan cara pemancaran sinar β^- .



Sinar beta (${}^0_{-1}\hat{a}$) sama dengan elektron (${}^0_{-1}\text{e}$). Pemancaan electron in dapat menyebabkan perubahan nomor atom dari Z menjadi $Z + 1$. Proses ini banyak ditemukan pada unsur alam dan unsur buatan, misalnya:



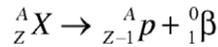
Secara sederhana, pada proses ini terjadi perubahan neutron menjadi proton dengan memancarkan sinar beta.



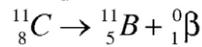
2) Inti di Bawah Pita Kestabilan

Unsur-unsur yang terletak di bawah pita kestabilan memiliki

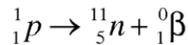
nilai $\frac{N}{Z}$ kecil sehingga unsur ini berusaha mengurangi jumlah protonnya. Pengurangan jumlah proton dilakukan dengan cara pemancaran positron.



Proses ini menyebabkan perubahan nomor atom dari Z menjadi $Z - 1$, misalnya



Jadi, proses pemancaran positron terjadi perubahan proton menjadi neutron

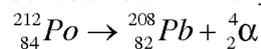


Coba Anda perhatikan kembali gambar di atas. Pada garis lurus l_1 , $N = Z$, unsur-unsur ringan terletak pada garis ini dan merupakan unsur yang stabil. Kestabilan inti berat terletak pada garis l_2 , perbandingan antara jumlah neutron (N) dan jumlah proton (Z) berkisar antara 1,5 dan 1,6. Unsur-unsur yang terletak pada garis l_2 ini masih stabil.

Tabel 8.2 Rasio N/Z untuk beberapa inti stabil

Inti	${}^2 H$	${}^{20} Ne$	${}^{40} Cu$	${}^{64} Zn$	${}^{90} Sn$	${}^{130} Ne$	${}^{202} Hg$
Z	1	10	20	30	40	50	80
N	1	10	20	34	50	70	122
$\frac{N}{Z}$	1	1	1	1,13	1,25	1,4	1,53

Unsur-unsur yang terletak di luar pita kestabilan ($Z > 83$) seluruhnya tidak stabil dan memiliki kecenderungan untuk mengurangi massanya yang terlalu besar dengan memancarkan sinar alfa (${}^4_2 \alpha$). Pada proses ini, nomor atom akan berubah dari Z menjadi $Z - 2$ dan nomor massanya akan berubah dari A menjadi $A - 4$. Misalnya,



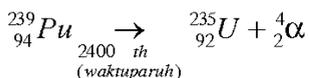
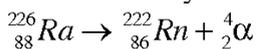
1. Peluruhan Unsur Radioaktif

Pada 1903, *Ernest Rutherford* dan *Frederick Saddy* mem-postulatkan bahwa keradioaktifan tidak hanya disebabkan oleh perubahan yang bersifat atomis yang sebelumnya berlangsung, namun pemancaran radioaktif berlangsung bersamaan dengan perubahan atomis tersebut.

Mereka memperoleh tiga jenis radiasi saat suatu inti meluruh menuju keadaan stabil, yaitu pemancaran alfa (α), beta (β), dan gamma (γ).

a. Pemancaran Sinar α

Pada proses pemancaran sinar α , inti induk A_ZX memancarkan sebuah partikel α (4_2He) sehingga menghasilkan inti anak dengan nomor massa yang berkurang 4 dan nomor atom yang berkurang dua nomor di sebelah kiri inti induk dalam system periodik unsur. Contohnya,



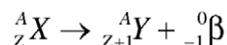
${}^{209}Bi$ merupakan inti berat stabil yang ada di alam. Unsur dengan $A \geq 210$ dan $Z > 83$ cenderung meluruh dengan memancarkan sinar α . Unsur berat dengan $A \leq 92$ selain memiliki kecenderungan memancarkan sinar α , juga memiliki kecenderungan untuk mengalami reaksi fisi.

Unsur-unsur yang stabil di bagian tengah sistem periodik merupakan unsure α aktif yang lemah dengan waktu paruh yang sangat panjang, yaitu $10^{11} - 10^{15}$ tahun. Unsur-unsur ini, misalnya ${}^{144}_{60}Nd$, ${}^{150}_{62}Sm$, ${}^{157}_{64}Gd$, dan ${}^{195}_{78}Pt$

b. Pemancaran Sinar β

Bila terdapat inti atom yang meluruh dengan memancarkan β^- , maka jumlah nomor massanya tetap dan jumlah nomor atomnya bertambah 1. Misalnya, A_ZX adalah inti mula-mula,

kemudian inti ini meluruh dengan memancarkan β^- maka:

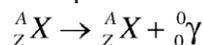


Dengan ${}^A_{Z+1} Y$ adalah inti setelah mengalami mengalami peluruhan.

c. Pemancaran Sinar γ

Sinar gamma (γ) merupakan foton yang memiliki energi sangat tinggi. Peluruhan sebuah inti dengan memancarkan sinar γ mirip dengan pemancaran foton-foton oleh elektron tereksitasi yang kembali ke keadaan dengan energi lebih rendah. Elektron tereksitasi yang kemabli ke keadaan dasar akan memancarkan foton yang energinya sesuai dengan perbedaan energi antara keadaan awa dan keadaan akhir dalam transisi yang bersangkutan.

Sinar γ tidak memiliki massa maupun muatan. Oleh sebab itu, unsur yang memncarkan sinar γ tidak mengalami perubahan nomor atom maupun nomor massanya.



Uji Kemampuan 8.4

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

- Dari reaksi ${}^7_3 \text{Li} + {}^1_0 \text{n} \rightarrow {}^3_1 \text{H} + {}^4_2 \text{He} + \text{X}$, tentukan partikel X.
- Suatu inti nitrogen ${}^{12}_6 \text{C}$ bereaksi dengan proton menghasilkan ${}^{12}_6 \text{C}$ dan X. Tentukan jenis partikel X tersebut.
- Tentukan nama partikel X pada reaksi berikut.
 - ${}^{17}_7 \text{N} + \alpha \rightarrow \text{X} + \text{p}$
 - $\alpha + {}^9_2 \text{Be} \rightarrow {}^{12}_6 \text{C} + \text{X}$
 - ${}^1_1 \text{H} + {}^2_1 \text{H} \rightarrow {}^3_1 \text{H} + \text{X}$
 - ${}^{235}_{92} \text{U} + {}^1_0 \text{n} \rightarrow {}^{140}_{54} \text{Xe} + {}^{94}_{38} \text{Sr} + 2\text{X}$
- Uranium-235 menyerap neutron cepat dan pecah menjadi ${}^{93}_{37} \text{Rb}$ dan ${}^{141}_{55} \text{Cs}$. Nukleon apa yang dihasilkan dalam reaksi tersebut dan berapa banyaknya?

5. Waktu Paruh dan Aktivitas Radioaktif

Setiap isotop radioaktif akan mengalami proses peluruhan menjadi unsur lain yang lebih stabil. Proses peluruhan ini berjalan dengan kecepatan yang berbeda-beda dan hanya bergantung pada jenis isotopnya.

Jika N adalah jumlah zat radioaktif pada saat t , jumlah zat yang meluruh per satuan waktu dapat dinyatakan oleh persamaan diferensial berikut.

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Dengan λ = konstanta peluruhan (per satuan waktu). Perhitungan integralnya akan menghasilkan

$$-\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t \lambda dt \rightarrow -\ln \frac{N}{N_0} = \lambda t$$

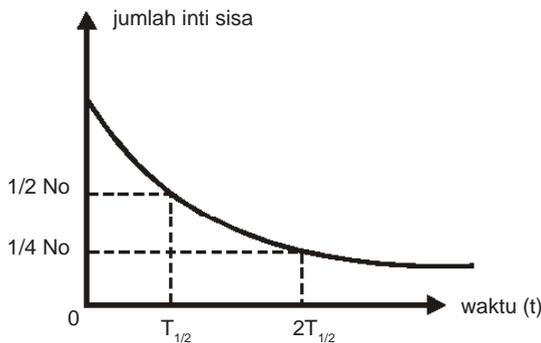
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

dengan:

N_0 = jumlah zat radioaktif pada saat $t = 0$

e = bilangan natural = 2,71828

Coba Anda perhatikan gambar berikut ini.



Gambar 8.12

Peluruhan Inti Radioaktif

Interval waktu antara jumlah semula (N_0) dan setengah jumlah semula ($\frac{1}{2} N_0$) adalah $\frac{T_1}{2}$ yang disebut dengan waktu paruh. Dengan kata lain, waktu paruh ($\frac{T_1}{2}$) adalah waktu yang diperlukan oleh zat radioaktif sehingga keaktifannya berkurang menjadi separuh (setengah) dari keaktifan semula.

Pada saat $t = \frac{T_1}{2}$, $N = \frac{1}{2} N_0$. Dengan cara memasukkan syarat batas ini ke persamaan di atas maka akan diperoleh:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\lambda} \left(-\ln \frac{\frac{1}{2} N_0}{N_0} \right) \rightarrow T_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{\lambda} \ln 2$$

Karena $\ln 2 = 0,693$ maka diperoleh

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Untuk menghitung jumlah unsur yang masih tersisa (N_t) setelah unsur meluruh selama waktu t , dapat digunakan persamaan sebagai berikut.

$$N_t = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}}$$

Perlu Anda ketahui setiap unsur radioaktif memiliki harga $T_{\frac{1}{2}}$ yang khas dan tidak bergantung massa, waktu, temperatur, amupun kelarutan. Dengan kata lain, peluruhan zat radioaktif itu tidak terkendali dan sangat aktif. Ada

unsur yang harga $T_{\frac{1}{2}}$ nya hanya 10^{-7} detik dan ada pula yang 10^{14} tahun. Dengan mengetahui harga waktu paruh suatu unsure radioaktif, Anda dapat menghitung jumlah unsur tersebut yang masih tersisa pada waktu tertentu.

Berkurangnya massa unsur radioaktif menjadi unsur lain yang stabil selama proses peluruhan sebanding dengan turunnya aktivitas dan jumlah atom unsur tersebut. Penurunan aktivitas unsur tersebut dirumuskan sebagai berikut.

$$A = N = N_0 e^{-\lambda t}$$

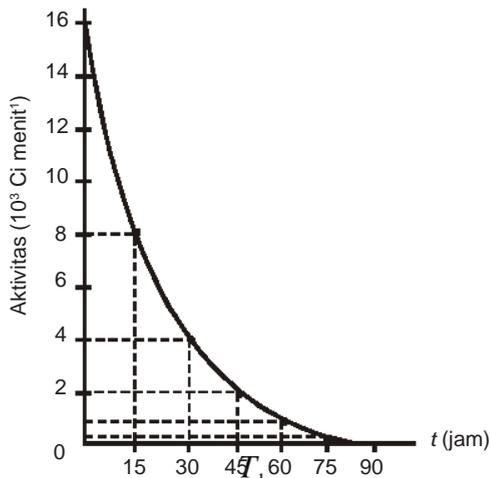
$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

dengan:

A_0 = aktivitas pada $t = 0$

A = aktivitas setelah selang waktu t

Karakteristik peluruhan dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 8.13

Peluruhan unsur ^{23}Na dengan $T_{1/2} = 15,03 \text{ jam}$.

Setelah meluruh selama $t = \frac{1}{2} T_{1/2}$, aktivitas suatu unsure radioaktif akan menjadi sebagai berikut.

$$A = A_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Satuan aktivitas adalah Curie (Ci), sebagai penghargaan kepada keluarga Curie atas jasanya dalam bidang radioaktivitas. Aktivitas 1 Curie didefinisikan sebagai 1 gram radium (^{226}Ra) yang diperoleh Piere dan Marie Curie pada 1898 yang besarnya: $1 \text{ curie (Ci)} = 3,7 \times 10^{10} \text{ pancaran partikel sekon}^{-1}$.

Dalam satuan SI, aktivitas diberi satuan Becquerel (Bq) diambil dari nama *Henry Becquerel*, seorang penemu radioaktivitas pada 1896.

$1 \text{ becquerel (Bq)} = 1 \text{ partikel sekon}^{-1}$

Sehingga $1 \text{ curie (Ci)} = 3,7 \times 10^{10} \text{ becquerel (Bq)}$

Peluhan radioaktif memiliki banyak penerapan, di antaranya radiokative adating yang digunakan untuk menentukan umur suatu benda atau fosil. Isotop yang biasa digunakan untuk keperluan ini adalah isotop karbon ^{14}C dan isotop ^{238}U . Isotop karbon hanya digunakan untuk umur benda kurang dari 60.000 tahun. Adapun isotop uranium, misalnya dapat digunakan untuk menunjukkan umur batuan bumi yang hampir 4×10^9 tahun.

Uji Kemampuan 8.5

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Waktu paruh suatu bahan radioaktif adalah 10 jam. Radiasi awal cuplikan diukur dan diperoleh 1200 hitungan tiap menit. Berapa banyak hitungan per menit yang diperoleh setelah:
 - a. 15 jam
 - b. 30 jam;
 - c. 45 jam;
 - d. 60 jam.
2. Aktivitas sebuah sumber radioaktif berkurang $\frac{7}{8}$ bagian dari aktivitas awalnya dalam selang waktu 30 jam. Tentukan waktu paruh dan tetapan peluruhan.
3. Berapakah aktivitas radioaktif 10 gram radium ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ yang memiliki waktu paruh 1620 tahun jika bilangan Avogadro $N_0 = 6,025 \times 10^{23}$ partikel/mol?

6. Dosis Serap

Inti atom yang meluruh akan memancarkan sinar radioaktif. Sinar radioaktif terdiri dari sinar α , β , dan γ . Apabila mengenai bahan, energinya akan diserap. Penyerapan energi ini bisa hanya sebagian atau seluruhnya. Jumlah energi radiasi yang diserap oleh satu satuan massa bahan dinamakan *dosis serap*.

Persamaan dosis serap antara lain sebagai berikut.

$$D = \frac{E}{m}$$

dengan:

D = dosis serap (J/kg)

E = energi (J)

m = massa (kg)

Satuan dosis serap adalah J/kg dinamakan gray (Gy). Satu gray adalah energi radiasi 1 joule yang diserap oleh 1 kg bahan. Satuan lain dosis serap adalah rad (rd) dengan kesetaraan 1 rad = 0,01 Gy. Sinar radioaktif merupakan materi yang dapat bergerak sehingga memiliki intensitas. Gambar 10.3 di samping, menunjukkan bahwa intensitas mula-mula I_0 menembus bahan setebal d dan sebagian radiasi diserap bahan sehingga intensitas yang keluar dari bahan I berkurang. Jika $I = \frac{1}{2}I_0$ maka tebal lapisan d disebut lapisan harga paruh (HVL).

Besar intensitas yang keluar dari bahan dirumuskan:

$$I = I_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{d}{HVL}}$$

dengan:

I = intensitas sisa/setelah melewati bahan (W/m^2)

I_0 = intensitas mula-mula (W/m^2)

d = tebal bahan (m)

HVL = lapisan harga paruh (m)

Lapisan harga paruh (HVL) dapat dicari dengan menggunakan koefisien pelemahan (μ). Hubungan HVL dan μ adalah sebagai berikut.

$$HVL = \frac{0,693}{\mu}$$

Semakin banyak dosis serapan yang diterima oleh benda, semakin banyak energi yang diterima. Jika tubuh manusia terkena terlalu banyak radiasi akan memungkinkan terjadinya ionisasi dalam tubuh. Hal ini cukup membahayakan. Contohnya, jika tubuh manusia terkena radiasi samapai 600 rad maka dalam dua minggu kan terjadi kerontokan rambut. Dosis sebesar 1000 rad yang mengenai manusia selama dua bulan akan menimbulkan kematian.

Uji Kemampuan 8.6

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Hitung koefisien pelemahan suatu bahan yang terkena suatu radiasi jika memiliki HVL:
 - a. 0,131 cm;
 - b. 3,12 cm;
 - c. 4,05 cm
 - d. 7,20 cm
2. Pelindung radiasi digunakan agar intensitas yang diterima 10% dari intensitas sumber radiasi. Jika digunakan bahan dengan nilai koefisien pelemahan $0,5 \text{ cm}^{-1}$, hitung tebal bahan yang diperlukan.
3. Suatu bahan memiliki HVL 3 cm. Berapa bagian intensitas sinar radioaktif yang datang pada benda akan diserap jika tebal bahan 5 cm?
4. Suatu bahan memiliki HVL 3,0 mm untuk radiasi sinar β . Jika intensitas radiasi ingin dikurangi 90% dari intensitas semula, tentukan ketebalan bahan yang diperlukan.

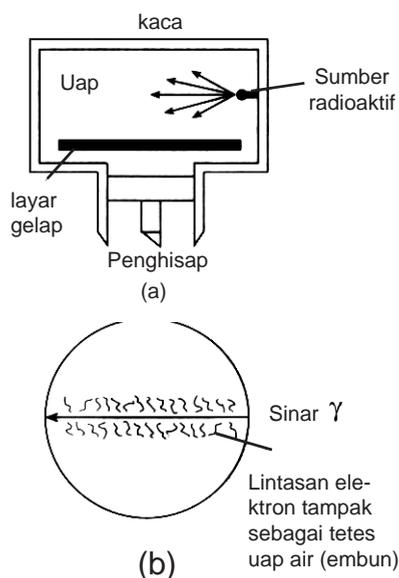
7. Alat-alat Deteksi Radioaktivitas

Alat yang digunakan untuk mendeteksi adanya radioaktif dinamakan detektor. Detektor sinar radioaktif ada bermacam-macam, antara lain kamar kabut Wilson, pencacah Geiger Muller, alat pencacah kelipatan (sintilator), dan emulsi film.

a. Kamar Kabut Wilson

Alat ini disebut kamar kabut karena prinsip kerja alat ini memanfaatkan uap jenuh seperti yang tampak pada **gambar (a)**. Prinsip ini ditemukan oleh C.T.R. Wilson pada 1911 sehingga disebut kamar kabut Wilson.

Untuk membuat uap yang jenuh digunakan pendingin yang berasal dari CO_2 padat. Jika terdapat partikel yang melintasi uap jenuh, partikel akan mengionisasi uap tersebut. Ionisasi ini mengakibatkan timbulnya inti kondensasi (tetesan cairan). Ini dapat dilihat dengan bantuan cahaya yang dipancarkan ke ruangan tersebut. Jejak partikel dapat diamati sesuai dengan panjang dan tebalnya titik-titik tempat terjadinya kondensasi.



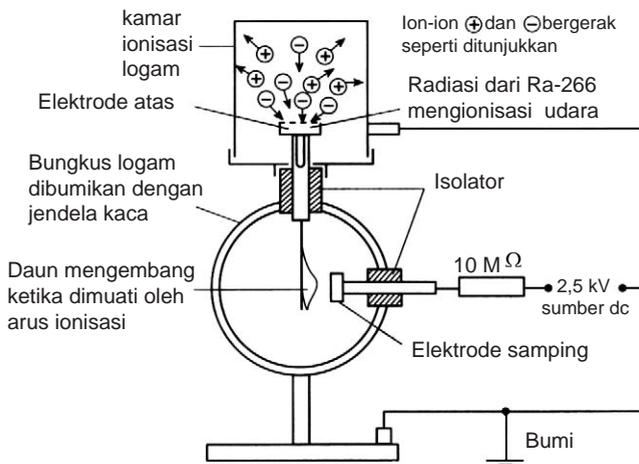
Gambar 8.14

- (a) Prinsip kerja kamar kabut;
(b) Lintasan yang diperoleh pada detektor dengan partikel yang dideteksi adalah sinar γ .

Jika kamar kabut ditempatkan dalam medan magnetik maka muatan dan jenis partikel dapat ditentukan dari lengkungan lintasannya. Contoh lintasan partikel tidak bermuatan (sinar γ) dapat dilihat dari gambar (b).

b. Elektroskop Pulsa

Prinsip kerja alat ini diilustrasikan pada gambar berikut.



Gambar 8.15
Prinsip Kerja Elektroskop Pulsa

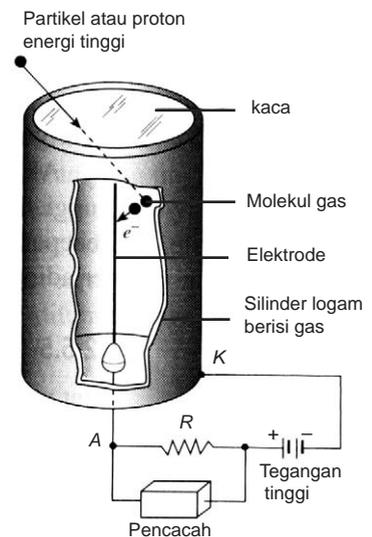
Sewaktu partikel yang dipancarkan oleh unsur radioaktif ke dalam kamar ionisasi, gas yang ada di kamar tersebut akan terionisasi. Ion-ion positif akan ditarik oleh elektroda negative. Sebaliknya, ion negative akan ditarik oleh elektrode positif. Akibat adanya muatan yang sejenis pada elektroda positif, “daun” yang berada di logam bundar akan mengembang. Mengembangnya “daun” tersebut akan dideteksi oleh rangkaian elektronik.

c. Pencacah Geiger-Muller

Pencacah ini dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan sinar-X, sinar γ , dan partikel β . Dapat juga digunakan untuk mendeteksi partikel α jika digunakan jendela mika yang tipis.

Terdapat dua elektroda yang dipasang pada alat ini. Tabung silinder bertindak sebagai katode dan sebagai anode digunakan kawat. Gas yang digunakan adalah gas argon pada tekanan 100 mmHg ditambah sedikit klorin.

Jika tabung menangkap partikel dari radiasi luar, gas argon akan terionisasi menjadi ion positif dan ion negatif. Ion negatif akan ditarik menuju ke anode. Selama perjalanannya, ion ini juga akan mengionisasi gas argon yang dilewatinya. Terjadilah banyak sekali ion pada ruang tersebut menuju ke anode sehingga terjadilah arus listrik



Gambar 8.16
Prinsip Kerja Tabung Geiger-Muller

yang cukup besar. Dalam waktu yang singkat arus terputus, tetapi setiap kali partikel radioaktif masuk ke dalam tabung, timbul lagi arus listrik berupa pulsa dalam rangkaian. Pulsa inilah yang dideteksi menjadi bunyi melalui *loudspeaker*.

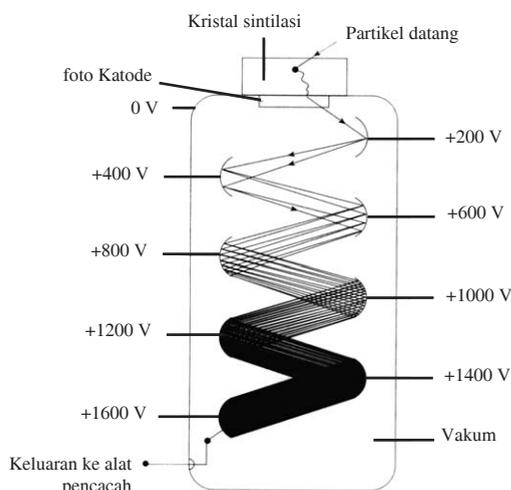
d. Emulsi Film

Alat yang dapat digunakan untuk mendeteksi lintasan partikel secara langsung adalah emulsi film. Jika emulsi film dikenai partikel akan terjadi ionisasi pada film tersebut. Lintasan yang dilalui oleh partikel akan mengubah susunan kimia emulsi film. Jika emulsi film dikembangkan, jejak-jejak partikel akan terlihat.

e. Detektor Sintilasi

Pada detektor sintilasi (sintilasi = percikan cahaya) terdapat zat yang dapat berpendar (fluoresensi) dan dapat digunakan untuk menangkap partikel-partikel bermuatan terutama partikel alfa. Jika zat tersebut terkena oleh partikel, zat itu akan berpendar berupa kelipan kecil yang terang. Semakin banyak partikel yang datang, semakin banyak pula kelipan yang terlihat. Alat ini dapat mengamati secara langsung peristiwa tumbukan partikel-partikel alfa dengan zat berpendar.

Jika kelipan cahaya jatuh pada katode, akan terjadi efek foto listrik dan elektron keluar dari katode. Elektron yang keluar digandakan 10^6 - 10^7 kali pada dinode dan akhirnya ditangkap oleh anode sehingga dalam rangkaian detektor sintilasi timbul denyut (pulsa) listrik dan dapat dibaca pada alat cacah.



Gambar 8.17
Detektor Sintilasi

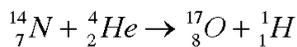
8. Reaksi Inti dan Energi Nuklir

Reaksi inti adalah interaksi antara partikel penembak (proyektil) yang terdiri atas partikel elementer, seperti foton, neutrino, dan inti multinukleon dengan suatu inti target. Reaksi tersebut dapat berupa penghamburan proyektil atau eksitasi inti target yang diikuti oleh transformasi inti menjadi inti lain dengan cara menangkap atau melepaskan partikel.

Pada setiap reaksi selalu berlaku hukum sebagai berikut.

- Hukum kekekalan momentum, yaitu jumlah momentum sebelum dan sesudah tumbukan sama.
- Hukum kekekalan nomor atom, yaitu jumlah nomor atom sebelum dan sesudah reaksi sama.
- Hukum kekekalan nomor massa, yaitu jumlah nomor massa sebelum dan sesudah reaksi sama.
- Hukum kekekalan energi total, yaitu energi total sebelum dan sesudah reaksi sama.

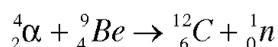
Orang yang kali pertama melihat reaksi inti adalah Ernest Rutherford. Pada 1919, ia membombardir inti atom nitrogen (${}^7_{14}\text{N}$) dengan sinar α . Reaksi tersebut menghasilkan isotop oksigen ${}^8_{17}\text{O}$.



Coba Anda perhatikan jumlah nomor atom dan jumlah nomor massa ruas kiri sama dengan jumlah nomor atom dan nomor massa ruas kanan.

Jumlah nomor massa sebelum reaksi adalah $14 + 4 = 18$ dan jumlah nomor atom sebelum sebelum reaksi adalah $7 + 2 = 9$. Reaksi tersebut menghasilkan inti atom oksigen dengan nomor massa 17 dan nomor atom 8 serta partikel proton dengan nomor massa 1 dan nomor atom 1. Jumlah nomor massa sesudah reaksi adalah $17 + 1 = 18$ dan jumlah nomor atom sesudah reaksi yaitu 9.

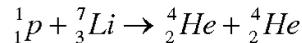
James Chadwick pada 1937 melakukan suatu eksperimen dan mendapatkan partikel yang baru kali pertama diketahui dan disebut neutron. Chadwick menembakkan partikel alfa pada keping berillium sehingga menghasilkan neutron dan inti carbon 12.



Pada persamaan reaksi ini juga berlaku hukum kekekalan nomor massa dan nomor atom.

Reaksi-reaksi tersebut umumnya hanya terjadi jika partikel α memiliki energi yang cukup besar. Jika energinya terlalu rendah, partikel α hanya dapat mendekati inti pada jarak yang agak jauh karena adanya gaya tolak-menolak antara partikel α dan inti. Hal tersebut mengakibatkan tidak terjadinya interaksi antara partikel α dan inti. Agar terjadi interaksi, energi partikel alfa harus diperbesar sehingga jarak antara partikel alfa dan inti dapat diperkecil. Alat yang digunakan untuk mempercepat partikel alfa dengan energi tinggi adalah akselerator (pemercepat).

Partikel yang lebih kecil daripada partikel α , misalnya proton dan deuteron (2D) dapat pula digunakan untuk mengganggu kestabilan inti dengan harapan agar akhirnya inti tersebut menjadi inti-inti lain. Pada 1932, Corckroft dan Walton menyatakan bahwa proton yang dipercepat melalui medan listrik dengan beda potensial 150 kV dapat membelah inti helium sehingga dihasilkan dua inti helium. Persamaan pada peristiwa tersebut dapat ditulis sebagai berikut.



Pada reaksi ini juga berlaku hukum kekekalan nomor massa dan nomor atom.

Pada reaksi inti berlaku prinsip Kesetaraan Massa-Energi berdasarkan persamaan seperti yang diberikan Einstein, yaitu $E = \Lambda mc^2$.

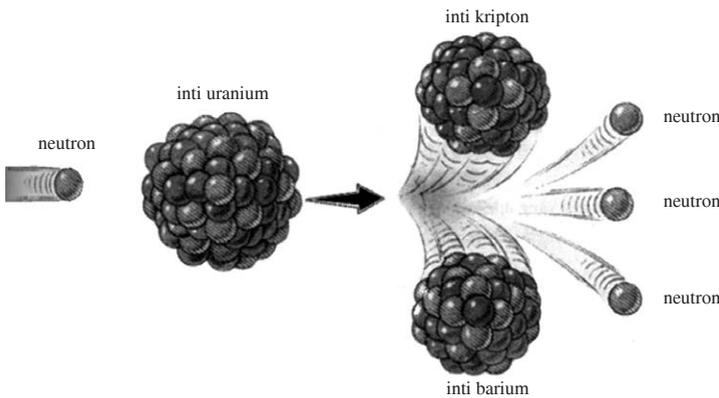
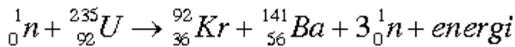
Reaksi inti dapat berupa pembelahan inti atom menjadi dua inti atom yang lebih ringan atau sebaliknya. Dapat juga berupa penggabungan 2 inti atom ringan menjadi inti atom yang lebih berat. Pembelahan inti atom disebut reaksi fisi dan penggabungan inti atom disebut reaksi fusi.

a. Reaksi Fisi

Pada 1934, **Enrico Fermi** melakukan eksperimen dengan menembaki inti uranium β dengan neutron sehingga dihasilkan inti majemuk uranium (${}^{238}_{92}U$) yang dapat meluruh dengan memancarkan sinar β sehingga membentuk unsur baru dengan nomor atom 93. Kemudian, unsur tersebut

meluruh sambil memancarkan sinar β dan membentuk inti baru lagi.

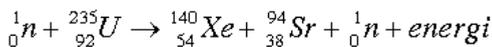
Kemudian, Fermi mencoba menggunakan ${}^{238}_{92}\text{U}$ dan dihasilkan unsur yang bersifat radium. Pada awalnya, Fermi menduga bahwa unsure yang diperolehnya itu adalah salah satu isotop radium. Setelah Hahn dan Strassmann melakukan penelitian terhadap unsur tersebut secara radiokimia, ternyata unsure tersebut adalah unsure barium yang memiliki nomor atom 56 dan unsure lainnya yang terbentuk adalah unsure dengan nomor 36. Selanjutnya, proses penembakan inti uranium oleh neutron itu diselidiki oleh Frisch dan Meitner pada 1938 secara teoritik dan mereka menamakan proses tersebut sebagai proses fisi yang artinya pembelahan. Persamaan reaksi pembelahan inti uranium tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.



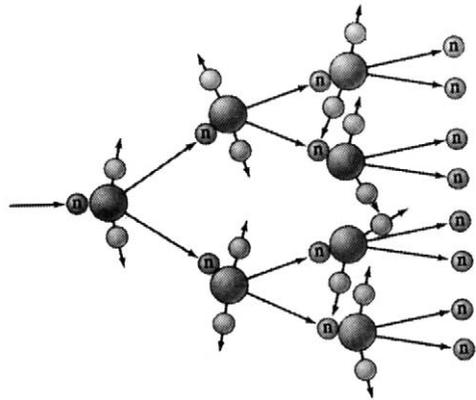
Gambar 8.18

Inti uranium yang ditembakkan akan menghasilkan reaksi fisi dan inti uranium tersebut membelah menjadi inti barium, krypton, dan 3 buah elektron.

Contoh lain dari reaksi fisi adalah sebagai berikut.



Uranium ${}^{235}_{92}\text{U}$ dapat mengadakan reaksi fisi jika ditembaki oleh neutron berenergi rendah, sekitar 0,025 eV yang disebut neutron termal. Reaksi tersebut dinamakan reaksi fisi termal. Adapun uranium ${}^{235}_{92}\text{U}$ dapat membelah jika ditembaki neutron cepat berenergi sekitar 1,4 MeV. Reaksi fisi semacam ini disebut fisi cepat (*fast fission*).



● neutron
 ● fisi yang membelah
 ● inti $^{235}_{92}\text{U}$

Gambar 8.19

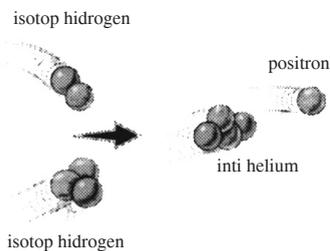
Reaksi Fisi Berantai

Energi yang dihasilkan pada reaksi fisi sangat besar. Misalnya, pada reaksi fisi dari 1 gram uranium dihasilkan energi sekitar $8,2 \times 10^{10}$ joule yang dapat digunakan untuk mendidihkan 200.000 liter air. Selain menghasilkan kalor reaksi fisi juga menghasilkan dua atau tiga neutron baru dan setiap neutron baru itu akan menembaki uranium yang masih ada untuk melakukan pembelahan (fisi) sambil menghasilkan energi. Pembelahan inti itu akan berlangsung terus-menerus sampai uraniumnya habis. Peristiwa ini disebut reaksi fisi berantai. Pembelahan inti yang terus-menerus itu berlangsung dalam waktu yang sangat singkat sehingga jika tidak terkontrol dapat menimbulkan ledakan yang sangat dahsyat, misalnya pada bom atom. Akan tetapi, jika reaksi fisi berantai itu terjadi di dalam reaktor nuklir, reaksi tersebut akan dapat dikendalikan sehingga tidak menimbulkan ledakan.

b. Reaksi Fusi

Inti ringan dengan nomor massa kurang dari 8 dapat berabung membentuk inti yang lebih berat jika memiliki energi yang cukup besa runut menembus potensial gaya Coulomb. Ternyata, proses ini hanya dapat terjadi pada suhu yang sangat tinggi dan disebut termonuklir.

Reaksi penggabungan inti tersebut dinamakan reaksi fusi. Reaksi fusi sering disebut sebagai reaksi termonuklir karena pada prosesnya memerlukan suhu tinggi. Hingga saat ini, reaksi fusi masih belum dapat dikendalikan. Hal ini disebabkan belum adanya bahan yang tahan terhadap panas yang sangat tinggi dan bahan tersebut juga harus tahan terhadap tekanan tinggi. Selain itu, untuk menghasilkan bahan baku reaksi fusi diperlukan biaya yang sangat tinggi.

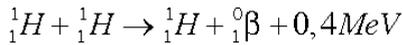


Gambar 8.20

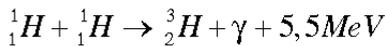
Reaksi Fusi

Contoh reaksi fusi adalah reaksi inti yang terjadi di matahari dan bintang-bintang. Reaksi termonuklir yang terjadi di matahari, di antaranya peleburan hidrogen (${}^1_1\text{H}$) menjadi inti helium (${}^4_2\text{He}$). Reaksi yang terjadi di matahari dapat dituliskan sebagai berikut.

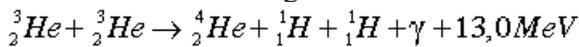
- a. Pada tahap awal reaksi, proton bergabung dengan proton membentuk deuterium ${}^2_1\text{H}$.



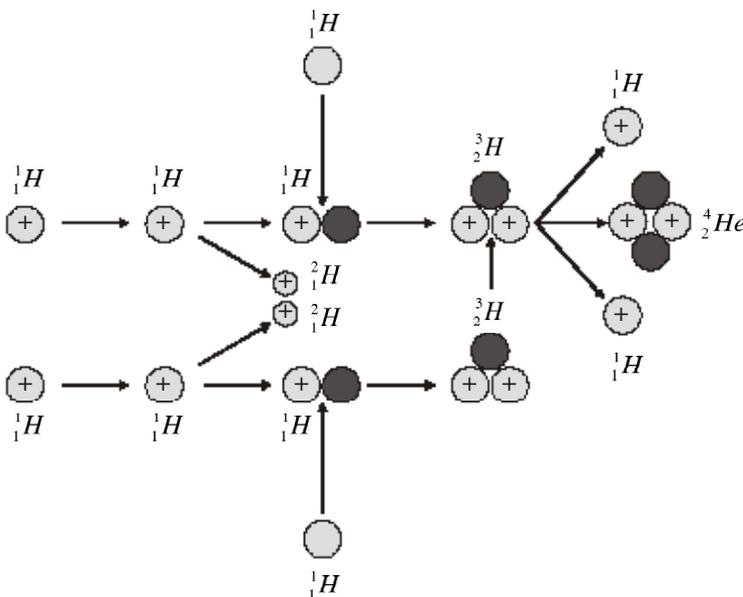
- b. Deuterium bergabung dengan proton membentuk inti tritium



- c. Inti ${}^3_1\text{H}$ beraksi menghasilkan inti ${}^4_2\text{He}$



Reaksi fusi yang berlangsung spontan hanya dapat terjadi pada temperature dan tekanan yang sangat tinggi, agar inti yang ikut dalam proses itu memiliki energi yang cukup untuk bereaksi.



Gambar 8.21

Penggabungan empat inti hidrogen membentuk inti helium disertai pelepasan energi.

Uji Kemampuan 8.7

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

1. Energi yang dikonsumsi oleh rakyat Indonesia adalah $4,5 \times 10^{10}$ joule setiap tahunnya. Hitung U-235 yang harus disediakan untuk keperluan ini.
2. Hitunglah energi yang dibebaskan saat radium-226 (massa inti = 226,02540 sma) meluruh dan memancarkan partikel α menjadi radon-222 (massa inti = 222,01757 sma)
3. Dalam pengujian bom atom, energi yang dibebaskan sebesar 36 kilo TNT (1 kilo TNT ekivalen dengan 5×10^{12} J). Berapa banyak massa U-235 yang diubah menjadi energi?
4. Suatu reaksi fisi menghasilkan energi 210 MeV tiap fisi. Berapa banyak fisi yang terjadi tiap sekon jika reaktor menghasilkan daya 130 MW.
5. Sebuah PLTN memiliki efisiensi 20%. Listrik yang disuplai oleh PLTN 900 MW. Jika setiap fisi membebaskan energi 300 MeV, berapa kg uranium yang diperlukan tiap tahun?
6. Reaktor nuklir menghasilkan fisi sebanyak 3×10^{19} tiap sekon. Setiap fisi menghasilkan energi 200 MeV. Hitung daya yang dihasilkan oleh reaktor tersebut.

9. Reaktor Nuklir

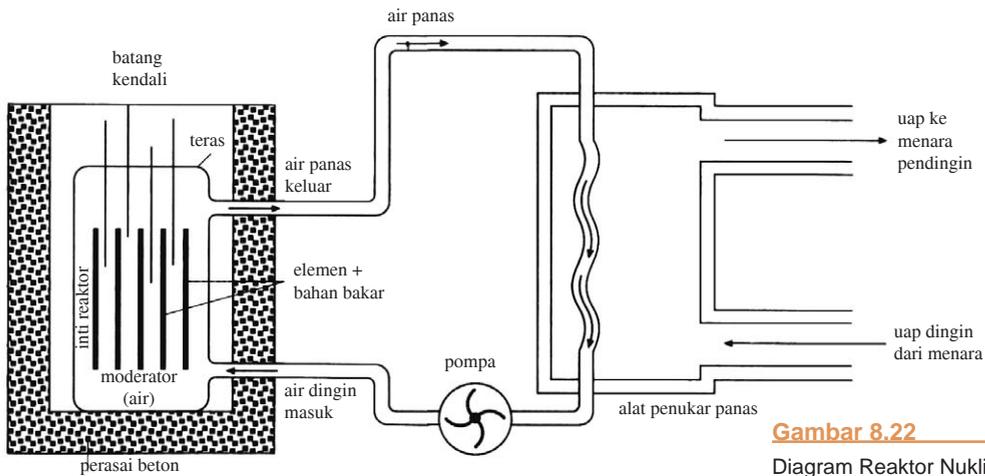
Reaktor nuklir adalah tempat terjadinya reaksi pembelahan inti (nuklir) atau dikenal dengan reaksi fisi berantai yang terkendali. Bagian utama dari reaktor nuklir yaitu elemen bakar, moderator, pendingin, dan perisai. Reaksi fisi berantai terjadi jika inti dari suatu unsur dapat membelah (uranium-235 dan uranium-233) bereaksi dengan neutron termal/lambat yang akan menghasilkan unsur-unsur lain dengan cepat serta menimbulkan energi kalor dan neutron-neutron baru. Reaktor nuklir berdasarkan fungsinya dapat dibedakan menjadi dua, yaitu sebagai berikut.

- a. Reaktor penelitian/riset, yaitu reaktor yang digunakan untuk penelitian di bidang material, fisika, kimia, biologi, kedokteran, pertanian, industri, dan bidang-bidang ilmu pengetahuan dan teknologi lainnya.
- b. Reaktor isotop, yaitu reaktor yang digunakan untuk bidang kedokteran, farmasi, biologi, dan industri.
- c. Reaktor daya, yaitu reaktor yang dapat menghasilkan daya atau energi berupa kalor untuk dimanfaatkan lebih lanjut, misalnya untuk pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN).

Saat ini Indonesia memiliki reaktor penelitian dan reaktor isotop. Pusat Reaktor Atom Bandung (PRAB) di

Bandung menggunakan reaktor Triga Mark II (Triga = *Training Research dan Isotop Production by General Atomic*) dengan kapasitas daya 1 MW. Di Yogyakarta juga dengan nama reaktor Triga, memiliki kapasitas daya 250 kW, sedangkan di Serpong yang diresmikan pada 1987, reaktornya bernama MPR-30 (MPR = *Multi Purpose Reactor*) memiliki kapasitas daya 30 MW.

Prinsip kerja reaktor atom dapat dijelaskan dengan gambar sebagai berikut.



Gambar 8.22
Diagram Reaktor Nuklir

Kalor yang dihasilkan reaktor nuklir dibuang melalui sistem pendingin. Sistem pendingin yang digunakan ada dua jenis, yaitu sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder. Sistem pendingin primer akan mengambil panas dari reaktor, kemudian membuangnya ke pendingin sekunder melalui alat penukar panas (*heat exchanger*). Sistem pendingin sekunder akan membuang panas melalui menara pendingin.

Komponen dasar suatu reaktor adalah bahan bakar, moderator, batang kendali, perisai beton, dan pendingin. **Bahan bakar** yang digunakan dalam reaktor nuklir adalah uranium. Dalam bijih uranium di alam terdapat satu isotop U-235 untuk setiap 140 atom atau sekitar 0,7%, sedangkan sisanya adalah isotop U-238. Kebanyakan reaktor menggunakan bahan bakar yang sudah diperkaya hingga mengandung U-235 sebanyak 3%.

Bahan bakar uranium dicelupkan ke dalam reaktor. Uranium dibentuk mirip dengan tabung yang cukup sempit agar neutron yang dihasilkan dalam rekasi fisi memiliki peluang yang besar untuk keluar menuju ke moderator.

Ketika reaksi terjadi, inti U-235 menangkap sebuah neutron dan akan dihasilkan neutron cepat. Neutron ini tidak cukup untuk membuat U-235 mengalami rekasi fisi, namun masih harus diperlambat untuk dapat menghasilkan rekasi fisi dalam U-235. Neutron ini diperlambat oleh moderator. Bahan moderator adalah air berat atau grafit. Moderator juga berfungsi sebagai pendingin primer. Moderator yang efektif harus dapat memperlambat neutron tanpa banyak menyerap neutron yang diperlambatnya. Untuk tujuan ini, dipilih bahan moderator yang massa atomnya sepadan dengan massa neutron. Moderator yang sering dipakai adalah hydrogen dalam bentuk air, deuterium dalam bentuk air berat (D_2O) dan karbon dalam bentuk grafit. Moderator karbon dipilih bukan karena efektivitasnya namun karena harganya yang murah.

Batang-batang kendali digunakan untuk mengatir populasi neutron cepat. Idealnya, sebuah neutron tiap rekasi fisi diperlukan untuk melangsungkan reaksi terus-menerus (tiap pembelahan inti hanya menghasilkan satu pembelahan tambahan). Reaktor yang demikian dikatakan berada pada kondisi kritis. Kelajuan yang lebih tinggi akan membebaskan energi terlalu cepat dan reaksi akan kehilangan kendali. Batang kendali terbuat dari baja atau kadmium berlapis boron yang digunakan untuk menangkap neutron cepat.

Jika batang kendali digerakkan ke atas, jumlah neutron yang dapat menimbulkan reaksi fisi akan bertambah. Sebaliknya, jika batang kendali digerakkan ke bawah, neutron yang dapat menimbulkan reaksi fisi akan berkurang. Kondisi reaktor yang memiliki jumlah neutron cepat terlalu banyak (tiap pembelahan inti menghasilkan lebih dari satu pembelahan tambahan) disebut kondisi *superkritis*, sedangkan kondisi reaktor yang memiliki jumlah neutron cepat terlalu sedikit (secara rata-rata tiap pembelahan inti menghasilkan kurang dari satu pembelahan tambahan) disebut kondisi *subkritis*.

Energi kalor yang dihasilkan dari reaksi fisi dipindahkan dengan melwatkan fluida pendingin. Fluida

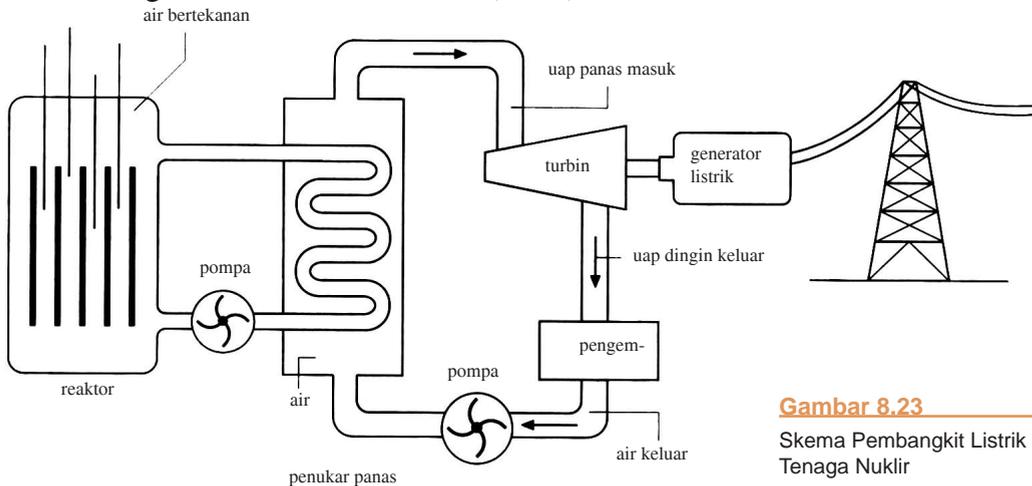
pendingin dapat berupa karbondioksida atau air. Fluida pendingin ini dilewatkan ke mesin penukar panas dan menghasilkan uap panas untuk digunakan sebagai penggerak turbin. Semua komponen reaktor ditempatkan dalam perisai beton (*shielding*) yang tebal untuk melindungi para pekerja dari bahaya radiasi.

Berdasarkan jenis pendinginnya, terdapat empat jenis reaktor, yaitu:

- reaktor dengan pendingin gas, menggunakan grafit sebagai moderator;
- reaktor dengan pendingin air ringan (H_2O) yang terdiri reaktor air bertekanan atau *pressurized water* (PWR) dan reaktor air lebih didih atau boiling water reactor (HWR);
- reaktor dengan pendingin air berat (D_2O);
- reaktor dengan pendingin logam cair (Na).

10. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

Sebagian besar reaktor komersial misalnya PLTN menggunakan air ringan sebagai moderator yang sekaligus berfungsi sebagai pendingin. Coba Anda perhatikan gambar berikut, PLTN dengan reaktor air bertekanan (PWR).



Gambar 8.23

Skema Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

Kalor yang dihasilkan oleh batang bahan bakar diberikan pada air (sistem pendingin primer) Air ini dialirkan keluar teras reaktor menuju alat penukar panas oleh pompa primer. Agar lebih efektif membawa panas, suhu air dibuat cukup tinggi ($\pm 300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Untuk mencegah air pendingin

menjadi uap pada suhu yang demikian tinggi, air diberi tekanan yang tinggi. Di tempat penukar panas akan terjadi perpindahan panas dari air pendingin ke air yang akan diuapkan untuk menggerakkan turbin. Turbin akan memutar genartor sehingga dihasilkan daya listrik. Setelah uap keluar dari turbin (uap menjadi air). Air ini dialirkan kembali ke alat penukar panas oleh pompa sekunder. Demikian selanjutnya terjadi siklus yang berulang.

Dalam suatu reaktor nuklir, energi yang dihasilkan (E) dari fisi inti sejumlah N adalah

$$E = NE_f$$

Dengan E_f dalah energi yang dihasilkan setiap kali fisi. Banyak (jumlah) inti unsure (N) dapat diperoleh dari hubungan

$$N = \frac{mN_0}{A_r}$$

Dengan m = massa unsur sebagai bahan baker (g), N_0 = bilangan Avogadro ($6,02 \times 10^{23}/\text{mol}$) dan A_r = massa atom relatif unsur (g/mol).

Jika daya yang dihasilkan oleh rekator adalah P maka laju fisi dinyatakan sebagai berikut.

$$\text{laju fisi} = \frac{P}{E_f} (\text{pembelahan / sekon})$$

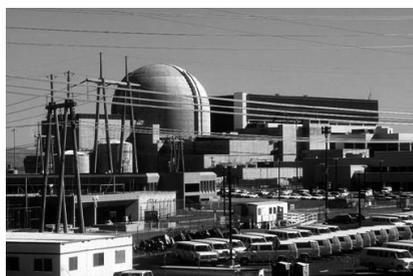
Uji Kemampuan 8.8

Kerjakanlah dalam buku latihanmu.

Coba kamu buat makalah tentang energi nuklir yang akan digunakan sebagai pembangkit tenaga listrik? Carilah sumber-sumbernya dari majalah, internet, koran, atau buku-buku referensi lainnya.

Apakah tepat saat ini di Indonesia untuk membuat Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di saat terjadi krisis energi listrik? Apa keuntungan dan kerugiannya?

Kemudian, diskusikan dengan teman-teman Anda di kelas dengan bantuan guru Anda sebagai mediator (penengah).



11. Radioisotop

Anda telah mengenal definsi radiosiotop, tetapi Anda belum mengetahui cara pembuatan dan penggunaan radioisotop tersebut.

a. Pembuatan Radioisotop

Karena waktu paruh dari inti aktif suatu radioisotop tidak terlalu lama, pada umumnya radioisotope yang digunakan dalam berbagai keperluan tidak terdapat di alam. Oleh sebab itu, radioisotop yang dibutuhkan harus dibuat dari radioisotope stabil alamiah melalui reaksi inti.

Untuk memproduksi radioisotop dalam jumlah banyak, cara yang umum digunakan antara lain menggunakan reaksi inti dengan neutron. Bahan-bahan yang tidak aktif, seperti natrium, kromium, ataupun iodium dimasukkan ke dalam reaktor produksi radioisotope. Ketika reaktor dioperasikan maka neutron dari fisi digunakan untuk meradiasi bahan isotop. Unsur-unsur bahan baku isotop yang beraksi dengan neutron akan menjadi katif. Unsur-unsur yang aktif inilah yang disebut dengan radioisotop. Contoh-contoh radioisotop buatan BATAN, yaitu ^{24}Na , ^{32}P , ^{51}Cr , ^{90}Tc , dan ^{131}I .

b. Penggunaan Radioisotop

Akhir-akhir ini, radioisotope sudah banyak digunakan di bidang kedokteran, industri, pertanian, dan dalam berbagai bidang kehidupan lainnya.

1) Bidang Kedokteran

Dalam bidang kedokteran, radioisotop dapat digunakan sebagai diagnosis maupun sebagai terapi, midalnya untuk diagnosis kanker ataupun diagnosis fungsi kerja jantung.

Kobal Co-60 dapat digunakan sebagai penyinaran kanker. Co-60 ini sebagai pengganti radiasi sinar-X jika di dalam pengobatan tersebut memerlukan intensitas sinar yang lebih kuat. Demikian juga produksi yang berlebihan dari hormon gondok dapat dikendalikan dengan cara si pasien meminum suatu larutan yang mengandung iodium I-131. Iodium akan sampai pada kelenjar gondok dan dapat memberikan radioterapi internal.

2) Bidang Industri

Penerapan teknik nuklir dalam menunjang industri dan konstruksi sudah sangat luas, misalnya dalam pemeriksaan material menggunakan teknik radiografi dengan sinar γ atau sinar-X dipancarkan dari radioisotop. Co-60 atau Ir-92 dilewatkan melalui material yang akan diperiksa, sebagian dari sinar tersebut akan diteruskan dan sisanya akan diserap tanpa merusak material.

Selembur film dipasang di belakang material guna mendeteksi sinar yang berhasil menembus. Dari tingkat kehitaman film hasil proses dapat diketahui keadaan serta struktur yang ada pada material tersebut. Selain itu, teknologi nuklir juga digunakan dalam industri polimerisasi radiasi, yaitu industri pengolahan bahan mentah menjadi bahan setengah jadi atau bahan jadi dengan bantuan sinar radiasi untuk mempermudah dan mempercepat reaksi kimia. Bahan yang diolah dapat berupa polimer lateks (karet alam), kayu, polietilen, polipropilen, dan sebagainya.

3) Bidang hidrologi

a) Pengukuran laju air

Radioisotop dapat digunakan untuk mengukur laju alir atau debit aliran fluida dalam pipa, saluran terbuka, sungai, serta air dalam tanah. Dasar pengukuran ini adalah menggunakan perunut radioaktif. Akibat adanya aliran, konsentrasi perunut radioaktif dalam jangka waktu tertentu akan berubah. Debit aliran fluida diperoleh dari pengukuran perubahan intensitas radiasi dalam aliran tersebut dalam jangka waktu tertentu.

b) Pengukuran kandungan air tanah

Suatu alat yang memiliki sumber neutron cepat dimasukkan ke dalam sebuah sumur sehingga terjadi tumbukan antara neutron cepat dan hidrogen dari air (H_2O). Tumbukan ini akan menghasilkan neutron lambat yang dapat dideteksi dengan detector.

Jumlah kandungan air dalam tanah dapat ditentukan dari cacahan yang terdeteksi pada detector.

c) Pendeteksi kebocoran pipa

Radioisotop dapat pula digunakan untuk mendeteksi kebocoran tiap penyalur yang terbenam di dalam tanah.

Mula-mula perunut radioaktif dimasukkan ke dalam aliran, kemudian diikuti dari atas melalui suatu detector. Jika di suatu tempat terdapat cacahan radioaktif yang tinggi, berarti di tempat tersebut terdapat kebocoran.

Ringkasan

Inti atom terdiri atas proton atau neutron. Keduanya disebut Nukleon.

Jumlah proton suatu inti atom dilambangkan dengan Z . Adapun jumlah nukleon dilambangkan dengan A . Penulisan secara lengkap notasi unsur X , yaitu



Unsur-unsur sejenis yang memiliki nomor atom sama, tetapi memiliki nomor massa berbeda disebut isotop. Isobar merupakan unsur-unsur dengan nomor massa sama dan nomor atom berbeda.

Untuk bentuk inti bola pejal, besar jari-jari inti dituliskan sebagai berikut.

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}}$$

Teknik spektrometer massa digunakan untuk mengukur massaberbagai isotop secara teliti. Massa isotop dalam spektrometer memenuhi persamaan berikut.

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

Kebanyakan, unsur radioaktif yang berada dalam merupakan anggota empat radioaktif. Adapun keempat deret radioaktif tersebut adalah sebagai berikut.

- Deret Thorium : $A = 4n$
- Deret Neptunium : $A = 4n + 1$

- Deret Uranium : $A = 4n + 2$

- Deret Aktinium : $A = 4n + 3$

Untuk menghitung jumlah unsur radioaktif yang masih tersisa (N_t) setelah meluruh selama waktu t dapat digunakan persamaan berikut.

$$N_t = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Aktivitas suatu unsur radiaktifdituliskan sebagai berikut.

$$A = A_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

Jika seberkas sinar radioaktif dilewatkan pada sebuah kepingdangan ketebalan x , intensitas sinar radioaktif tersebut akan mengalami pelemahan yang memenuhi persamaan berikut.

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Besarnya energi pengion yang diserap suatu materi dalam elemen volume dengan massa tertentu disebut dosis serap yang dituliskan sebagai berikut.

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$

Uji Kompetensi Bab 8

A. Pilihlah satu jawaban yang benar

- Jumlah proton dan neutron yang ada dalam inti ${}^{239}_{93}\text{Np}$ adalah
 - 239 dan 332
 - 146 dan 239
 - 93 dan 239
 - 93 dan 332
 - 93 dan 146
- Salah satu isotop uranium adalah ${}^{235}\text{U}$. Dari data tersebut dapat diketahui jumlah proton dan neutron di dalam intinya adalah
 - 92 dan 143
 - 143 dan 92
 - 92 dan 235
 - 235 dan 92
 - 143 dan 235
- Peristiwa dalam inti yang menyebabkan zat radioaktif memancarkan positron adalah
 - perubahan proton menjadi neutron
 - perubahan neutron menjadi proton
 - pancaran sinar-X
 - penangkapan electron
 - perubahan nomor massa
- Jika diketahui konstanta jari-jari inti $R_0 = 1,2 \times 10^{-13}$ cm dan diketahui 1 fermi = 10^{-13} cm, tentukanlah jari-jari inti atom karbon ${}^{12}\text{C}$.
 - 1,2 fermi
 - 1,7 fermi
 - 2,2 fermi
 - 2,7 fermi
 - 3,6 fermi
- Perhatikan reaksi inti berikut ini.

$${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \text{X}$$

$${}^{11}_5\text{B} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{11}_6\text{C} + \text{Y}$$

$${}^6_3\text{Li} + \text{Z} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$$

Maka, X, Y, dan Z adalah

A.	${}^{18}_9\text{O}$	${}^1_1\text{H}$	${}^2_1\text{H}$
B.	${}^{17}_9\text{O}$	${}^2_1\text{H}$	${}^1_0\text{n}$
C.	${}^{17}_8\text{O}$	${}^1_0\text{n}$	${}^2_1\text{H}$
D.	${}^{17}_9\text{O}$	${}^1_0\text{n}$	${}^2_1\text{H}$
E.	${}^{17}_8\text{O}$	${}^2_1\text{H}$	${}^0_{-1}\text{e}$
- Tentukan defek massa dari unsur litium ${}^7_3\text{Li}$, jika massanya adalah 7,01600 sma. Perlu diketahui massa ${}^1_1\text{H} = 1,00783$ sma dan massa ${}^1_0\text{n} = 1,00866$ sma.
 - 0,02407 sma
 - 0,04207 sma
 - 0,07240 sma
 - 0,09724 sma
 - 0,42070 sma
- Dalam suatu peluruhan (desintegrasi) inti ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + \text{X}$. Maka, X adalah
 - electron
 - proton
 - neutron
 - sinar gamma
 - positron
- Massa inti ${}^4_2\text{H}$ dan ${}^2_1\text{H}$ masing-masing 4,00260 sma dan 2,01410 sma. Energi minimum yang diperlukan untuk memecah partikel α menjadi dua deutron adalah sekitar
 - 4 MeV
 - 14 MeV
 - 24 MeV
 - 34 MeV
 - 44 MeV
- Jika suatu neutron dalam suatu inti berubah menjadi proton maka inti itu memancarkan
 - partikel alfa
 - partikel beta
 - sinar gamma
 - proton
 - deutron
- Suatu inti nitrogen ${}^{15}_7\text{N}$ yang bereaksi dengan proton menghasilkan ${}^{12}_6\text{C}$ dan
 - neutron
 - partikel alfa
 - positron
 - elektron
 - deutron
- Atom ${}^{14}_7\text{N}$ ditembak dengan partikel alfa dan dalam proses itu sebuah proton dibebaskan. Reaksi inti termaksud menghasilkan
 - ${}^{14}_7\text{N}$
 - ${}^{17}_8\text{O}$
 - ${}^{16}_8\text{O}$
 - ${}^{17}_8\text{F}$
 - ${}^{17}_{10}\text{Ne}$
- Berikut ini yang merupakan reaksi fusi adalah

- a. ${}_{11}^{23}\text{Na} + \alpha \rightarrow {}_{12}^{20}\text{Mg} + {}_1^1\text{H}$
 b. ${}_{7}^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow {}_{8}^{17}\text{O} + {}_1^1\text{H}$
 c. ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + \alpha + \gamma$
 d. ${}_1^2\text{H} + {}_6^{13}\text{C} \rightarrow {}_7^{14}\text{N}$
 e. ${}_1^2\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + \text{energi}$
13. Jika inti ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ memancarkan partikel alfa dan sinar gamma maka inti yang terjadi
 a. ${}_{84}^{224}\text{Po}$ d. ${}_{87}^{224}\text{Fr}$
 b. ${}_{86}^{222}\text{Rn}$ e. ${}_{89}^{226}\text{Ac}$
 c. ${}_{88}^{226}\text{Rn}$
14. Perbandingan nomor atom dan nomor massa suatu partikel sama dengan perbandingan antara nomor atom dan nomor massa pada partikel α maka partikel tersebut adalah
 a. partikel $+\beta$ d. inti ${}_2^4\text{He}$
 b. inti ${}_1^2\text{H}$ e. inti ${}_3^7\text{Li}$
 c. inti ${}_2^3\text{He}$
15. Ba-137 melepaskan foton sinar gamma 0,66 MeV dalam transisi internalnya. Energi kinetik partikel atom tersebut sekitar
 a. 0,6 eV d. 3,3 eV
 b. 1,7 eV e. 4,8 eV
 c. 2,6 eV
16. Setelah 9 hari, suatu zat radioaktif meluruh sebanyak $\frac{7}{8}$ massa mula-mula. Konstanta peluruhannya adalah
 a. 0,023 per hari d. 2,310 per hari
 b. 0,231 per hari e. 2,310 per hari
 c. 0,347 per hari
17. ${}_{92}^{238}\text{U}$ meluruh menjadi isotop timbal ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ oleh emisi 8 partikel alfa dan oleh emisi elektron sebanyak
 a. 6 d. 3
 b. 5 e. 2
 c. 4
18. Alat deteksi sinar radioaktif yang cara kerjanya mengubah ionisasi gas menjadi gas menjadi pulsa listrik adalah
 a. kamar kabut Wilson
 b. pencacah Geiger
 c. detektor sintilasi
 d. deteksi emulsi film
 e. detektor *solid state*
19. Satu isotop ${}_{82}^{210}\text{Pb}$ yang memiliki waktu paruh 22 tahun dibeli 44 tahun *vanas* lalu. Isotop ini akan berubah menjadi ${}_{83}^{210}\text{Bi}$. Sisa ${}_{82}^{210}\text{Pb}$ pada saat ini adalah
 a. 85% d. 25%
 b. 65% e. 15%
 c. 50%
20. Jika diketahui koefisien pelemahan suatu bahan aluminium terhadap sinar beta tertentu adalah $0,3 \text{ mm}^{-1}$. Nilai HVL dari aluminium terhadap sinar beta tersebut adalah
 a. 0,231 mm d. 2,310 mm
 b. 0,300 mm e. 3,000 mm
 c. 0,093 mm

B. Soal Uraian

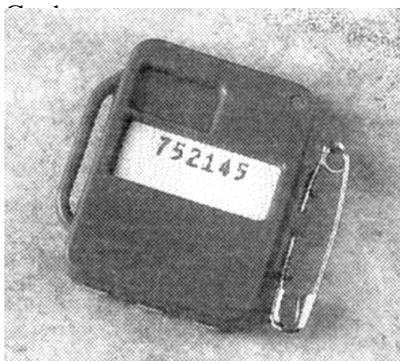
Jawablah pertanyaan-pertanyaan dibawah ini dengan benar.

- Sejauh berapakah dalam ruang, intensitas sebuah berkas neutron 5 eV akan berkurang menjadi separuhnya? (Diketahui $T_{1/2} = 12,8$ menit)
- Massa inti ${}_2^4\text{H}$ dan ${}_1^2\text{H}$ masing-masing 4,002603 sma dan 2,014102 sma jika 1 sma = 931 MeV, tentukan besarnya energi minimum yang diperlukan untuk memecahkan partikel alfa tersebut menjadi dua deuteron.
- Berapa lamakah waktu yang diperlukan 5 mg ${}_{23}^{23}\text{Na}$ ($T_{1/2} = 2,60$ tahun) untuk berkurang menjadi 1 mg?

4. Di Matahari terjadi reaksi fusi dari $4\text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^4_2\text{He} + 2\text{}^0_1\beta$ jika jumlah massa $\text{}^1_1\text{H}$ yang telah terfusi sebanyak 1 gram, hitung besarnya energi yang dihasilkan.
5. Berapakah besar energi yang akan dibebaskan jika dua inti deuterium bergabung membentuk sebuah partikel alfa?
6. Satu fisi pada tom uranium menghasilkan energi sebesar 200 MeV. Jika sebuah reaktor beroperasi pada daya 1000 MW, tentukan banyaknya massa uranium yang dibutuhkan untuk menghasilkan daya tersebut dalam waktu 1 hari.
7. Dalam proses fisi sebuah inti $\text{}^{235}_{92}\text{U}$ lewat penyerapan neutron, membebaskan energi yang dapat dimanfaatkan sekitar 185 MeV.
8. Jika $\text{}^{235}_{92}\text{U}$ dalam sebuah reaktor secara terus-menerus membangkitkan daya sebesar 100 MW, berapakah waktu yang diperlukan untuk menghabiskan 1 kg uranium?
8. Aktivitas awal suatu unsure radioaktif adalah 10 Bq. Jika diketahui waktu paruhnya adalah 1 minggu, tentukan:
 - a. kekativannya setelah satu bulan;
 - b. tetapan peluruhan unsur tersebut.
9. Berapakah energi kinetik partikel alfa yang dipancarkan dalam peluruhan alfa dari inti $\text{}^{232}_{92}\text{U}$? Anggaplah inti $\text{}^{232}_{92}\text{U}$ meluruh dalam keadaan diam.
10. Suatu unsur radioaktif memiliki waktu paruh 20 hari. Berapa bagiankah zat radioaktif tersebut yang belum meluruh setelah 60 hari?

Physics in Action

Film Bedge



apa yang Anda ketahui tentang film badge. Ini merupakan alat yang paling umum dari dosimeter personal. Alat ini secara sederhana terdiri dari selembar film fotografi yang dipasang pada penjepit khusus. Film ini disematkan pada pakaian selama 1-4 minggu. Lalu, diproses sesuai dengan prosedur standar lalu tingkat kehitaman film diukur. Penjepitnya terbuat dari sejumlah filter yang memungkinkan radiasi dengan tipe yang beragam dapat teridentifikasi.

Banyaknya radiasi (dosis) beta yang diserap diukur dengan cara membandingkan tingkat kehitaman film melalui celah terbuka yang dilapisi dengan filter-filter plastic. Filter-filter ini memungkinkan kita untuk mengukur energi partikel beta. Filter-filter logam menyerap radiasi beta dan perbedaan antara foton-foton dengan beragam tingkat energi.

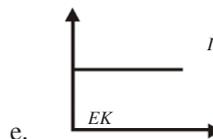
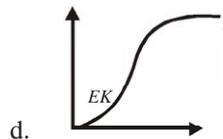
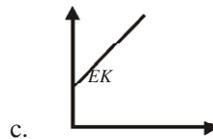
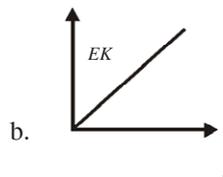
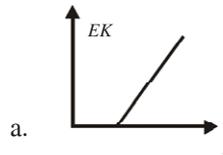
Dural, yang terbuat dari alloy (logam campuran) yang terutama terdiri dari aluminium, hanya menyerap sinar X bertegangan rendah, sementara alloy timbale akan menatenuasi semua energi. Neutron-neutron termal (dari sebuah reaktor), berinteraksi dengan alloy cadmium, menghasilkan radiasi gamma dan pajanan (paparan) radiasi tambahan di bawah filter ini.

Uji Kompetensi Semester 2

A. Pilihlah satu jawaban yang benar

- Menurut teori kuantum berkas cahaya terdiri atas foton. Intensitas berkas cahaya ini
 - berbanding lurus dengan energi foton
 - berbanding lurus dengan akar energi foton
 - berbanding lurus dengan banyaknya foton
 - berbanding lurus dengan kuadrat banyaknya foton
- Sebuah sumber tegangan $V = (6 \sin 120t)$ volt dihubungkan dengan sebuah resistor $R = 80 \text{ ohm}$ dan induktor $L = 0,5 \text{ H}$. Besarnya arus listrik maksimum yang melalui rangkaian tersebut adalah
 - 6 mA
 - 12 mA
 - 60 mA
 - 80 mA
 - 120 mA
- Permukaan bumi menerima radiasi matahari rata-rata $1,2 \text{ kW/m}^2$ saat terik. Jika panjang gelombang rata-rata radiasi ini 6620 \AA maka banyak foton per detik dalam berkas sinar matahari seluas 1 cm^2 secara tegak lurus adalah
 - 5×10^{17}
 - 4×10^{17}
 - 3×10^{17}
 - 2×10^{17}
 - 1×10^{17}
- Kawat berarus listrik memanjang dari barat ke timur. Apabila arah arus listrik pada kawat tersebut dari barat, arah medan magnet pada titik-titik yang berada di atas kawat akan menuju ke
 - timur
 - bawah
 - utara
 - selatan
 - barat

- Grafik yang menunjukkan hubungan antara energi kinetik fotoelektron (EK) dan intensitas I foton pada proses fotolistrik adalah



- Sebuah toroida memiliki jari-jari lingkaran efektif 10 cm . Banyaknya lilitan pada toroida tersebut 400 lilitan. Apabila dialiri arus listrik sebesar 5 A , induksi magnetik pada sumbu toroida adalah
 - $0,5 \text{ mT}$
 - $1,0 \text{ mT}$
 - $2,0 \text{ mT}$
 - $2,5 \text{ mT}$
 - $4,0 \text{ mT}$

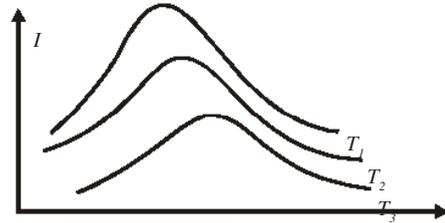
7. Perbandingan antara muatan dengan massa electron adalah $1,7588 \times 10^{11}$ coulomb/kg. Hal ini diselidiki oleh seorang ahli fisika bernama
- Thomson
 - Millikan
 - Rutherford
 - John Dalton
 - W.K. Roentgen
8. Jika sebuah kawat digerakkan sedemikian rupa sehingga memotong garis-garis gaya suatu medan magnet pada kedua ujung kawat itu timbul gaya gerak listrik induksi. Kaidah itu dirumuskan oleh
- Maxwell
 - Lenz
 - Foucault
 - Ampere
 - Faraday
9. Salah satu model atom menurut Bohr adalah
- elektron bergerak dengan lintasan stasioner
 - elektron merupakan bagian atom yang bermuatan negatif
 - tidak memiliki momentum angular
 - atom merupakan bola pejal bermuatan positif
 - atom tidak dapat dipecah-pecah lagi
10. Muatan A menolak muatan B dan menarik muatan c, sedangkan muatan C menolak muatan D. Jika C bermuatan positif
- muatan A positif
 - muatan b positif
 - muatan A negatif
 - muatan D negatif
 - muatan netral
11. Dalam spectrum pancaran atom hidrogen rasio antara panjang gelombang untuk radiasi Lyman ($n = 2$ ke $n = 1$) terhadap radiasi Balmer ($n = 3$ ke $n = 2$) adalah
- $\frac{5}{27}$
 - $\frac{5}{24}$
 - $\frac{1}{3}$
 - $\frac{3}{4}$
 - $\frac{5}{27}$
12. Tiga buah muatan yang sama terletak pada sudut-sudut segitiga sama sisi. Jika gaya antara dua muatan besarnya F, besarnya gaya total pada setiap muatan adalah
- $F\sqrt{2}$
 - $2F$
 - $2\sqrt{F}$
 - $F\sqrt{3}$
 - nol
13. Partikel ${}^4_2\alpha$ bergerak dengan kecepatan v m/s tegak lurus arah medan magnetik B, lintasan yang dilalui berjari-jari R_1 meter. Partikel ${}^3_1\text{H}$ bergerak dalam medan magnetik yang sama dengan kecepatan dan arah yang sama pula sehingga jari-jari lintasannya R_2 meter. Tentukan nilai $R_1 : R_2$.
- 4 : 3
 - 2 : 1
 - 2 : 3
 - 3 : 1
 - 1 : 4
14. Gelombang transversal adalah gelombang yang arah getarannya
- berlawanan dengan arah rambatannya
 - tegak lurus dengan arah rambatannya
 - searah dengan arah rambatannya
 - sejajar dengan arah rambatannya
 - membentuk sudut lancip dengan arah rambatannya
15. Jika ${}^3_2\text{He}$ dan ${}^4_2\text{He}$ dipisahkan oleh spektrometer massa maka akan dapat lintasan busur lingkaran yang jari-jarinya R_1 dan R_2 dengan R_1/R_2 sama dengan
- $\frac{5}{6}$
 - $\frac{3}{4}$
 - $\frac{2}{3}$

- d. $\frac{1}{2}$
 e. $\frac{2}{7}$

16. Efek mana yang hanya ditunjukkan oleh gelombang transversal
 a. Difraksi
 b. Pelayangan
 c. interferensi
 d. efek Dopler
 e. polarisasi
17. Sebuah partikel alfa memiliki massa empat kali dan muatan dua kali yang dimiliki sebuah proton. Keduanya, partikel alfa dan proton, sedang bergerak dengan kecepatan sama memasuki daerah medan listrik homogen yang arah kuat medannya berlawanan dengan arah gerak keduanya. Nilai perbandingan jarak tempuh partikel alfa dan jarak tempuh proton sampai keduanya berhenti adalah
 a. 1 : 4
 b. 1 : 2
 c. 1 : 1
 d. 2 : 1
 e. 4 : 1
18. Suatu gelombang berjalan melalui titik A dan B yang berjarak 8 cm dalam arah dari A ke B. Pada saat $t = 0$, simpangan gelombang di A adalah 0. Jika panjang gelombangnya 32 cm dan amplitudonya 6 cm maka simpangan titik B pada saat fase A = $\frac{4\pi}{3}$ adalah ... cm.
 a. 3
 b. $3\sqrt{2}$
 c. $3\sqrt{3}$
 d. 4
 e. 6
19. Massa inti ^9_4Be , massa proton 1,0078 sma dan massa neutron 1,0086 sma. Jika 1 sma setara dengan 931,15 MeV. Maka, besar energi ikat atom adalah
 a. 51,39 MeV
 b. 57,82 MeV
 c. 62,10 MeV

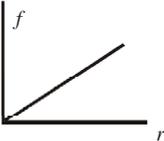
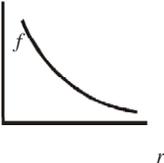
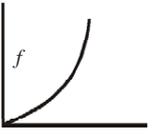
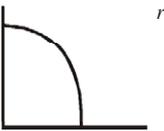
- d. 90,12 MeV
 e. 90,74 MeV

20. Berdasarkan grafik intensitas (I) terhadap panjang gelombang (λ) seperti di bawah dapat disimpulkan bahwa



- a. $T_1 = \frac{1}{2}T_2 = \frac{1}{4}T_3$
 b. $T_1 > T_2 > T_3$
 c. $T_1 < T_2; T_1 > T_3$
 d. $T_1 < T_2 < T_3$
21. Urutan daya tembus sinar-sinar radioaktif dimulai dari yang paling kuat adalah
 a. alfa, beta, dan gamma
 b. gamma, alfa, dan beta
 c. beta, alfa, dan gamma
 d. alfa, gamma, dan beta
 e. gamma, beta, dan alfa
22. Sebuah benda hitam suhunya 2000 K. Jika konstanta Wien = $2,898 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$ maka rapat energi maksimum yang dipancarkan benda itu terletak pada panjang gelombang λ_{maks} sebesar
 a. $1,4 \mu\text{m}$
 b. $2,9 \mu\text{m}$
 c. $5,8 \mu\text{m}$
 d. $7,3 \mu\text{m}$
 e. $12,4 \mu\text{m}$
23. Sebuah electron yang memiliki massa diam m_0 bergerak dengan kecepatan $0,6c$ maka energi kinetiknya adalah
 a. $0,25 m_0 c^2$
 b. $0,36 m_0 c^2$
 c. $m_0 c^2$
 d. $1,80 m_0 c^2$
 e. $2,80 m_0 c^2$

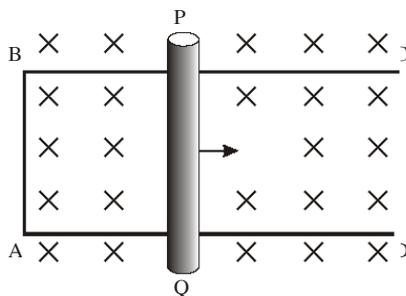
24. Kuantum energi yang terkandung di dalam sinar ultraviolet dengan panjang gelombang 3300 \AA , konstanta Planck $6,6 \times 10^{-34} \text{ J sekon}$ dan kecepatan cahaya $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ adalah
- $2 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $3 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $3,3 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $6 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $3 \times 10^{-19} \text{ J}$
25. Menurut Einstein, sebuah benda dengan massa diam itu m_0 setara dengan energi $m_0 c^2$, dengan c adalah kecepatan rambat cahaya di dalam ruang hampa. Jika benda bergerak dengan kecepatan v maka energi total benda setara dengan
- $\frac{1}{2} m_0 c^2$
 - $m_0 (2c^2 + v^2)$
 - $m_0 (c^2 + v^2)$
 - $\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$
 - $(2c^2 + v^2)$
26. Ketika electron foto dikeluarkan dari suatu permukaan logam oleh radiasi gelombang elektromagnetik, kelajuan maksimumnya bergantung pada
- frekuensi radiasi
 - intensitas radiasi
 - frekuensi dan intensitas radiasi
 - frekuensi radiasi dan fungsi kerja logam
 - frekuensi, intensitas radiasi, dan fungsi kerja logam
27. Sebuah roket bergerak dengan kecepatan $0,8c$. Jika dilihat oleh pengamat yang diam, panjang roket itu akan menyusut sebesar
- 20%
 - 36%
 - 40%
 - 60%
 - 80%
28. Fungsi kerja aluminium adalah $2,3 \text{ eV}$. Cahaya dengan panjang gelombang 660 nm akan mengeluarkan electron-foto dengan energi kinetic maksimum (laju cahaya $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, konstanta Planck = $6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$, $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$)
- $0,5 \text{ eV}$
 - $0,6 \text{ eV}$
 - $2,9 \text{ eV}$
 - $1,8 \text{ eV}$
 - negatif, yaitu tidak mampu mengeluarkan elektron-foto
29. Jika c adalah kelajuan cahaya di udara maka agar massa benda menjadi 125 persennya massa diam, benda harus digerakkan pada kelajuan
- $1,25c$
 - $1c$
 - $0,8c$
 - $0,6c$
 - $0,5c$
30. Jika sinar ungu berfrekuensi 10^{16} Hz dijumpukan pada permukaan logam yang memiliki energi ambang $2/3$ kali kuantum energi sinar ungu dan tetapan Planck = $6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}$ maka energi kinetic electron yang lepas adalah
- $1,1 \times 10^{-18} \text{ J}$
 - $2,2 \times 10^{-18} \text{ J}$
 - $3,3 \times 10^{-18} \text{ J}$
 - $4,4 \times 10^{-18} \text{ J}$
 - $6,6 \times 10^{-18} \text{ J}$
31. Sebuah benda melakukan gerak harmonik dengan amplitude A . Ketika kecepatannya sama dengan kecepatan maksimum, simpangannya adalah
- nol
 - $0,5A$
 - $0,64A$
 - $0,87A$
 - $1A$
32. Pada model atom Bohr untuk gas hydrogen, perbandingan periode electron yang mengelilingi inti pada orbit $n = 1$ dan pada orbit $n = 2$ adalah
- 1 : 2
 - 2 : 1
 - 1 : 4
 - 1 : 8
 - 1 : 1

33. Kawat untuk saluran transmisi listrik yang massanya 40 kg diikat antara dua menara tegangan tinggi yang jaraknya 200 m. Salah satu ujung kawat dipukul oleh teknisi yang berada di salah satu menara sehingga timbul gelombang yang merambat ke menara yang lain. Apabila gelombang pantul terdeteksi setelah 10 s maka tegangan kawat adalah
- 40 N
 - 60 N
 - 320 N
 - 80 N
 - 420 N
34. Elektron dalam sebuah atom hydrogen berada pada tingkat eksitasi pertama. Ketika electron tersebut menerima tambahan energi 2,86 eV, electron tersebut akan berpindah ke orbit
- $n = 2$
 - $n = 3$
 - $n = 3$
 - $n = 5$
 - $n = 6$
35. Dua buah benda bermuatan $+q_1$ dan $+q_2$ berjarak r satu sama lain. Jika jarak r diubah-ubah maka grafik yang menyatakan hubungan gaya interaksi kedua muatan F dengan r adalah
- 
 - 
 - 
 - 
 - 
36. Salah satu isotop uranium adalah ^{235}U . Dari data tersebut dapat diketahui jumlah proton dan neutron di dalam intinya adalah
- 92 dan 143
 - 143 dan 92
 - 92 dan 235
 - 235 dan 92
 - 143 dan 235
37. Besar kuat medan magnetik di suatu titik yang letaknya sejauh r dari suatu penghantar lurus yang dialiri arus I adalah sebanding dengan
- I
 - rI
 - r/I
 - I/r
 - $1/rI$
38. Kerangka acuan inersial merupakan kerangka acuan yang
- berputar pada titik pusatnya
 - diam, kemudian bergerak terhadap benda
 - bergerak, kemudian diam terhadap benda
 - diam atau bergerak dengan kecepatan berubah terhadap benda
 - diam atau bergerak dengan kecepatan tetap terhadap benda
39. Tegangan maksimum pada generator listrik bolak balik (AC) bergantung pada
- kecepatan sudut perputaran rotornya
 - besar induksi magnetic yang digunakan
 - jumlah lilitan rotornya
 - luas bidang lilitan rotornya
40. Ada dua orang bersaudara kembar A dan B. B naik pesawat Enterprise dengan kelajuan sebesar $0,8c$. Kemudian, A dan B bertemu pada suatu kesempatan dalam suatu acara keluarga. Menurut B mereka telah berpisah selama 12 tahun, sementara A mendebatnya tidak percaya. Lama perjalanan tersebut, menurut A adalah
- 8 tahun
 - 10 tahun
 - 12 tahun
 - 15 tahun
 - 20 tahun

B. Soal Uraian

Jawablah pertanyaan berikut dengan singkat dan jelas.

1. Tentukan energi kinetik maksimum electron-elektron yang dipancarkan dari sebuah permukaan dengan panjang gelombang ambang 6.000 \AA ketika cahaya 4.000 \AA jatuh pada permukaan itu.
2. Taraf intensitas bunyi sebuah kendaraan rata-rata 50 dB diukur dari jarak 1 meter. Tentukanlah taraf intensitas bunyi dari 10 kendaraan diukur dari jarak 10 meter.
3. Tentukan energi ionisasi hidrogen jika panjang gelombang terpendek dalam deret Balmer adalah 3.650 \AA .
4. Sebuah electron ($m = 9 \times 10^{-31} \text{ kg}$ dan $q = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$) ditembakkan dengan kecepatan 5 km/s searah dengan kuat medan listrik sebesar 2 kV/m. Berapakah jarak terjauh yang dapat ditempuh electron tersebut sebelum berhenti?
5. Sebuah partikel bermassa m_0 dan bergerak dengan kelajuan $0,6c$ menumbuk dan menempel pada partikel sejenis lainnya yang mula-mula diam. Berapakah massa diam dan kecepatan partikel gabungan ini?
6. Dari gambar berikut jika induksi magnetic 0,2 T dan kawat PQ dengan panjang 40 cm digeser ke kanan, tentukanlah GGI Induksi yang ditimbulkan serat arah arus induksinya.
7. Berapa lamakah waktu yang diperlukan 5 mg ${}_{23}^{23}\text{Na}$ ($T_{1/2} = 2,60$ tahun) untuk berkurang menjadi 1 mg?
8. Hitunglah ferkuensi resonansi rangkaian yang memiliki induktansi diri induktor 100 H dan kapasitansi kapasitor $400 \mu\text{F}$.
9. Berapakah energi kinetik partikel alfa yang dipancarkan dalam peluruhan alfa dari inti ${}_{92}^{232}\text{U}$? Anggaplah inti ${}_{92}^{232}\text{U}$ meluruh dalam keadaan diam.
10. Sebuah kumparan dengan induktansi diri induktor 200 mH dan sebuah kapasitor $2 \mu\text{F}$ disusun seri dengan frekuensi sumber tegangan 2000 rad/s. Apabila sudut fase antara tegangan sumber dan kuat arus 60° , tentukanlah hambatan kumparan tersebut.



Kewirausahaan

Membuat Model Periskop Sederhana

Tahukah Anda, bagaimana komandan kapal selam dapat melihat di permukaan laut. Untuk mengetahui keadaan di permukaan laut, kapal selam dilengkapi sebuah alat yang dinamakan periskop.



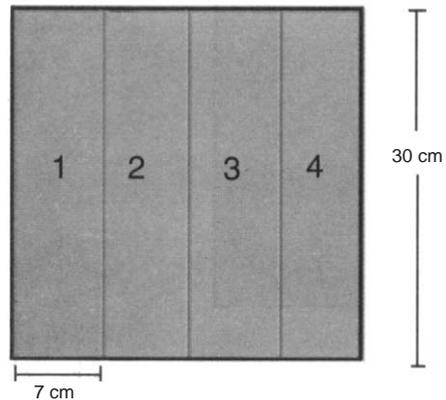
Sekarang, kita buat model periskop sederhana.

Coba Anda siapkan alat dan bahan yang diperlukan seperti, karton berukuran 30 cm × 28 cm, pensil, selotatif, dua buah cermin, masing-masing berukuran 8 cm × 7 cm, gunting, dan penggaris.

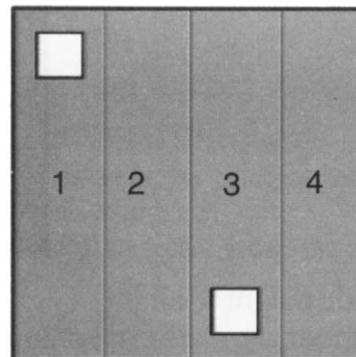
Untuk bahan-bahan di atas Anda dapat merogoh kocek Anda sekitar Rp20.000,00. Namun jika sudah selesai Anda akan menjualnya lebih dari alat dan bahan yang Anda beli. Anda dapat melipatkan harga sekitar 2 atau 3 kali lipat dari biaya produksi. Cukup menguntungkan bukan?

Coba kamu ikuti langkah-langkah membuat model periskop sederhana berikut.

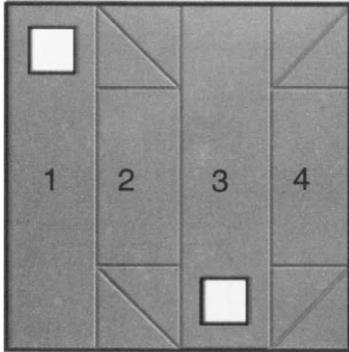
- Bagilah kertas karton menjadi 4 bagian sama besar, masing-masing sebesar 30 cm × 7 cm.



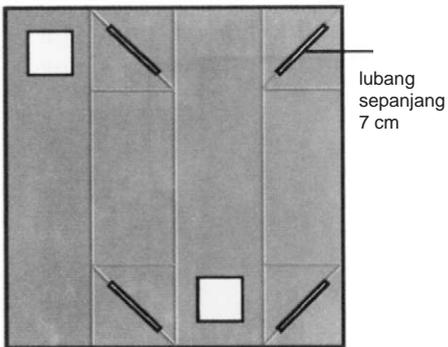
- Buatlah lubang persegi ukuran 5 cm × 5 cm pada bagian 1 dan 3. Untuk lebih jelasnya, dapat kamu lihat gambar berikut.



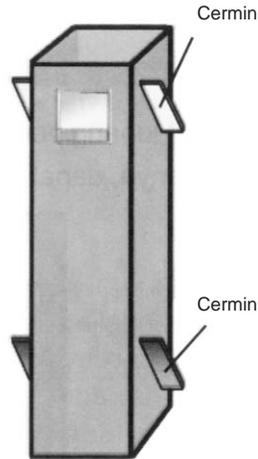
- Gambarkan kotak berukuran 7 cm × 7 cm pada setiap ujung bagian 2 dan 4. Lalu, buatlah garis diagonal pada kotak-kotak tersebut seperti gambar berikut.



- Lubangi garis diagonal tersebut sepanjang 7 cm.



- Lipat karton sehingga membentuk balok. Rekatkan ujung-ujungnya dengan selotip agar kuat. Setelah itu, sisipkan cermin pada lubang diagonal dengan posisi cermin saling berhadapan. Sekarang, periskopmu telah siap untuk digunakan.



Model periskop ini sering digunakan dalam praktiuk anak-anak sekolah dasar (SD) atau sekolah menengah pertama (SMP) untuk praktikum mengenai cermin. Pengembangan alat ini tidak hanya dibuat dalam bentuk kertas, tetapi Anda dapat membuatnya dengan menggunakan kayu. Selamat mencoba.

Daftar Pustaka

- Albert J. Ruff dkk. 2001. *Ilmu Pengetahuan Populer Fisika*. Grolier International, Inc.
- Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Dirjen Pendidikan. *Soal-Soal Ujian Masuk Perguruan Tinggi Negeri Tahun 1986 sampai dengan Tahun 1999*.
- Departemen Pendidikan dan Kebudayaan. *Soal-Soal Ebtanas (Evaluasi Belajar Tahap Akhir Nasional) Tahun 1992 sampai dengan Tahun 2002*.
- Halliday, Resnick. 1991. *Fisika Jilid 1, 2 (Terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Hudaya B., Winarno K.M. 1981. *Fisika Umum (College Physics)*. Bandung: Penerbit ARMICO.
- Murray, R. Spigel. 1981. *Schaum's Outline of Theory and Problems of Vector Analysis*. Singapore: McGraw-Hill International Book Company.
- Nyoman, Kertiasa. 1995. *Fisika Petunjuk Guru*. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Rochman, Maman Syaeful, Sri Setiowati Rejeki. 2000. *Panduan Pembelajaran di Laboratorium Fisika untuk Siswa SMU & MA*. Bandung: Bina Wiraswasta Insan Indonesia.
- Suroso A.Y., Anna P, Kardiawarman. 2003. *Ensiklopedia Sains & Kehidupan*. Jakarta: CV Tarity Samudra Berlian.
- Sutrisno, Tan Ik Gie. 1986. *Seri Fisika. Fisika Dasar*. Bandung: Penerbit ITB.
- Sears, Zemansky. 1971. *Fisika untuk Universitas*. Jakarta: Penerbit Binacipta.
- Tipler, P.A. 1991. *Physics For Scientists and Engineers*. Worth Publisher.
- Davies, 1997. *Buku Saku Penemuan (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Reid, Stuart dan Patricia Fara. 2000. *Seri Tanya Jawab: Penemuan Terkenal 1*. Jakarta: Penerbit Grafindo.
- Reid, Stuart dan Patricia Fara. 2000. *Seri Tanya Jawab: Penemuan Terkenal 2*. Jakarta: Penerbit Grafindo.
- Supriyadi 2001. *panduan untuk merancang Eksperimen Fisika Sederhana*. Yogyakarta: Tempelsari Publishing Company.
- Drajat. 2004. *Seri Tokoh Penemuan*. Bandung: Impact Media.

Lampiran

Konstanta	Simbol	Nilai
Kecepatan cahaya dalam vakum	c	$3,00 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$
Muatan dasar	e	$1,6010^{19} \text{ m}^{-1}$
Massa diam elektron	m_e	$9,1110^{-11} \text{ kg}$
Konstanta Permisivitas	ϵ_0	$8,5510^{-12} \text{ F/m}$
Konstanta Permiabilitas	μ_0	$1,2610^{-6}$
Perbandingan muatan dan massa elektron	e/m_e	$1,76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$
Massa diam elektron	m_p	$1,6710^{-27} \text{ kg}$
Perbandingan massa proton dan massa elektron	m_p/m_e	1840
Massa diam neutron	m_n	$1,6810^{-27} \text{ kg}$
Massa diam proton	m_p	$1,8810^{-28}$
Konstanta Planck	h	$6,63 \times 10^{-24} \text{ J.s}$
Panjang gelombang electron Compton	λ_c	$2,4310^{-12} \text{ m}$
Konstanta molar gas	R	$8,31 \text{ mol.K}$
Konstanta Avogadro	N_A	$6,0210^{23}/\text{mol}$
Konstanta Boltzmann	k	$1,3810^{-23} \text{ J/K}$
Volume molar gas ideal pada STP	V_m	$2,24 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{mol}$
Konstanta	F	$9,6510^4 \text{ C/mol}$
Konstanta Stefan-Boltzmann	s	$5,6710^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4$
Konstanta Rydberg	R	$1,1010^7 /\text{m}$
Konstanta Gravitasi	G	$6,6710^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2.\text{kg}$
Jari-jari Bohr	a_0	$5,29 \times 10^{-11} \text{ m}$
Momen magnetik elektron	μ_B	$9,2810^{-24} \text{ J/T}$
Momen magnetik proton	μ_p	$1,4110^{-26} \text{ J/T}$
Magneton Bohr	μ_B	$9,2710^{-24} \text{ J/T}$
Magneton Nuklear	μ_N	$5,0510^{-27} \text{ J/T}$

BESARAN TURUNAN DAN SATUANNYA DALAM SI

Besaran	Satuan
Frekuensi	hertz (Hz)
Gaya	newton (N)
Tekanan	pascal (Pa)
Energi, usaha, kalori	joule (J)
Daya	watt (W)
Muatan listrik	coulomb (C)
Potensial listrik	volt (V)
Kapasitas	farad (F)
Kapasitas listrik	ohm (Ω)
Fluks magnet	weber (Wb)
Medan magnet	tesla (T)
Induktansi	henry (H)

KONVERSI SATUAN

Panjang	
1 yard	= 0,9144 m
1 inci	= $2,540 \times 10^{-2}$ m
1 kaki	= 0,3048 m
1 mil	= 1.609 m
1 angstrom	= $1 \cdot 10^{-10}$ m
1 tahun cahaya	= $9,4600 \times 10^{15}$ m
1 parsek	= $3,084 \times 10^{16}$ m
Massa	
1 ons	= $2,835 \times 10^{-2}$ kg
1 pon	= 0,4536 kg
1 ton	= 90,2 kg
Kecepatan	
1 mil/jam	= $0,4470 \text{ ms}^{-1}$
1 pon	= $0,5144 \text{ ms}^{-1}$
Gaya	
1 dyne	= $1 \cdot 10^{-5}$ N
Tekanan	
1 atmosfer	= $1,013 \cdot 10^5$ Pa = 76 cmHg
1 pon	= $1 \cdot 10^5$ Pa
Energi	
1 energi	= 10^{-7} J
1 kalori	= 4,186 J
2 kilowatt	= $3,6 \cdot 10^6$ J
1 elektron volt	= $1,6020 \cdot 10^{-19}$ J
Daya	
1 Horsepower (hp)	= 745,7 watt
1 stat coulomb	= $3,336 \cdot 10^{-10}$ C
Sudut Bidang	
$1^\circ = 60' = 3600''$	
1 radian = 57,30°	
$1^\circ = 1,745 \cdot 10^{-2}$	
1 putaran = 360°	

Glosarium

Afinitas elektron	: Ukuran mudah atau sukarnya sebuah atom menangkap sebuah elektron dan berubah menjadi ion negatif.
Aktivitas inti	: Banyaknya inti unsur radioaktif yang meluruh tiap sekon.
Amplitudo	: Simpangan terjauh dari getaran.
Audiosonik	: Bunyi yang frekuensinya di antara 20 Hz hingga 20.000 Hz.
Bahan diamagnetik	: Bahan yang tidak dapat ditarik oleh gaya magnet.
Bahan feromagnetik	: Bahan yang dapat ditarik dengan kuat oleh gaya magnet.
Bahan paramagnetik	: Bahan yang dapat ditarik dengan lemah oleh gaya magnet.
Batang kendali	: Komponen reaktor nuklir yang dirancang untuk mengendalikan jumlah populasi neutron yang bereaksi dengan bahan bakar, atau untuk mengendalikan reaksi fisi dalam reaktor.
Benda hitam	: Benda yang menyerap semua cahaya yang sampai padanya.
Bilangan kuantum magnetik	: Bilangan yang menyatakan momen magnetik elektron.
Bilangan kuantum orbital	: Bilangan yang menentukan besarnya momentum sudut orbital elektron.
Bilangan kuantum spin	: Bilangan yang menyatakan bahwa elektron memiliki momentum anguler intrinsik yang ditimbulkan oleh gerak spin elektron pada sumbunya.
Bilangan kuantum utama	: Bilangan yang menunjukkan nomor kulit atom.
Cahaya monokromatis	: Sinar-sinar warna tunggal yang tidak dapat diuraikan lagi.
Cahaya polikromatis	: Sinar putih yang terdiri dari banyak warna dan dapat diuraikan menjadi cahaya monokromatis.
Cepat rambat gelombang	: Hasil bagi antara panjang gelombang dengan periode gelombang.
Cincin Newton	: Terjadinya pola lingkaran gelap terang yang disebabkan adanya interferensi cahaya pada saat sebuah lensa plankonveks diletakkan di atas lensa planparalel.
Daya urai	: Kemampuan sebuah lensa atau sistem optik dalam memisahkan bayangan dari dua titik sumber cahaya yang terpisah satu sama lain pada jarak minimum.
Desah	: Bunyi yang menghasilkan frekuensi tidak teratur.
Detektor	: Alat yang digunakan untuk mendeteksi adanya radioaktif.
Deviasi	: Sinar yang mengalami penyimpangan.
Diagram faser	: Gambar anak panah yang digunakan untuk menggambarkan

	beda fase getaran dua buah besaran atau lebih.
Difraksi	: Pelenturan gelombang.
Dinamo sepeda	: Alat yang mengubah energi kinetik menjadi energi listrik.
Dispersi	: Penguraian sinar polikromatik (banyak warna) menjadi sinar monokromatik (warna tunggal).
Dosis serap	: Jumlah energi radiasi yang diserap oleh satu satuan massa bahan.
Dualisme gelombang partikel	: Dua sifat sekaligus yang dimiliki cahaya, yaitu sifat sebagai gelombang dan sifat sebagai partikel.
Efek Doppler	: Perubahan tinggi frekuensi bunyi yang teramati oleh pendengar jika kecepatan antara sumber bunyi dengan pendengar berubah.
Efek fotolistrik	: Peristiwa pelepasan elektron dari permukaan logam karena disinari cahaya.
Eksklusi Pauli	: Pernyataan Pauli berupa larangan bahwa dalam sebuah atom tidak mungkin terdapat dua elektron yang memiliki keempat bilangan kuantum (n, l, m, m_s) yang sama.
Energi ikat inti	: Energi yang diperlukan untuk memecah nukleon-nukleon dari inti atom.
Energi ionisasi	: Energi yang diperlukan sebuah elektron untuk melepaskan diri dari ikatan yang paling lemah suatu atom netral atau suatu ion.
Energi nuklir	: Energi yang dihasilkan dari proses penggabungan atau pemecahan inti atom.
Energi potensial listrik	: Usaha untuk memindahkan suatu muatan uji dari tempat yang jauh tak terhingga ke suatu tempat di sekitar muatan sumber.
Eter	: Nama zat yang lebih halus daripada udara yang diperkirakan mengisi seluruh alam raya.
Filter cahaya	: Merupakan benda tembus cahaya yang berfungsi meneruskan warna-warna tertentu dan menahan warna-warna tertentu lainnya.
Fluks magnetik	: Jumlah garis-garis gaya magnetik yang menembus tegak lurus suatu permukaan bidang.
Fluoresensi	: Gejala berpendarnya suatu bahan saat menerima cahaya atau radiasi dari luar.
Foton	: Kuantum-kuantum yang bergerak dengan kecepatan cahaya.

Frekuensi	: Banyaknya getaran atau gelombang selama satu sekon.
Gaung	: Merupakan salah satu gejala pemantulan yang menyebabkan suara seseorang menjadi tidak jelas.
Gaya inti	: Gaya tarik-menarik antarnukleon, antara proton dengan proton, antara neutron dengan neutron, dan antara proton dengan neutron, yang masing-masing memiliki besar dan arah yang sama besar.
Gaya Lorentz	: Gaya yang timbul pada penghantar kawat berarus listrik yang diletakkan pada medan magnet.
Gejala difraksi	: Lenturan cahaya pada tepi penghalang.
Gelombang	: Usikan atau getaran yang merambat atau dirambatkan.
Gelombang berjalan	: Gelombang yang amplitudonya tetap.
Gelombang diam (stasioner)	: Gelombang yang amplitudonya berubah-ubah.
Gelombang elektromagnetik	: Gelombang yang tidak memerlukan medium dalam perambatannya.
Gelombang longitudinal	: Gelombang yang arah rambatnya sejajar dengan arah getarnya.
Gelombang mekanik	: Gelombang yang memerlukan medium dalam perambatannya.
Gelombang transversal	: Gelombang yang arah rambatnya tegak lurus dengan arah getarnya.
Generator	: Mesin yang mengubah energi kinetik menjadi energi listrik.
Generator AC	: Generator yang menghasilkan arus bolak-balik.
Hukum Coulomb	: Gaya antara dua muatan listrik sebanding dengan besar masing-masing muatan, dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan itu.
Hukum Faraday	: Jika jumlah fluks magnetik yang memasuki suatu kumparan berubah maka ujung-ujung kumparan akan timbul GGL induksi. Besarnya GGL induksi tergantung pada laju perubahan fluks magnetik dan banyaknya lilitan pada kumparan.
Hukum Gauss	: Jumlah garis medan listrik (fluks listrik) yang melalui sebuah permukaan tertutup berbanding lurus terhadap jumlah muatan yang diselimuti permukaan tersebut.
Hukum Pergeseran Wien	: Perkalian antara panjang gelombang maksimum dengan suhu mutlaknya merupakan hasil yang tetap.
Hukum periodik unsur-unsur	: Unsur-unsur yang disusun berturut-turut berdasarkan berat atomnya akan menunjukkan sifat-sifat unsur yang berulang secara periodik.
Hukum Stefan Boltzman	: Jumlah energi radiasi dari gelombang elektromagnetik yang

	dipancarkan per satuan waktu per satuan luas dari sebuah benda akan berbanding lurus dengan pangkat empat dari suhu mutlaknya.
Impedansi suatu rangkaian	: Hambatan total terhadap arus yang mengalir dalam rangkaian.
Induktansi diri	: Perubahan kuat arus 1 ampere setiap detik yang menyebabkan timbulnya GGL induksi sebesar 1 volt.
Infrasonik	: Bunyi yang berfrekuensi kurang dari 20 Hz.
Intensitas gelombang bunyi	: Besarnya energi gelombang bunyi yang dipindahkan tiap satuan waktu melalui bidang tiap satu luasan yang tegak lurus dengan arah cepat rambat gelombang.
Intensitas gelombang radiasi	: Daya yang dipancarkan benda tiap satuan luas benda.
Interferensi	: Perpaduan gelombang.
Interferensi destruktif	: Interferensi yang saling melemahkan.
Interferensi konstruktif	: Interferensi yang saling menguatkan.
Interferometer	: Alat yang digunakan untuk membuktikan keberadaan eter di alam ini dengan prinsip interferensi cahaya.
Inti atom	: Bagian dari atom yang terdiri dari proton dan neutron.
Isobar	: Dua atom atau lebih yang memiliki jumlah proton berbeda, tetapi jumlah neutronnya sama.
Isotop	: Dua atom atau lebih yang memiliki jumlah proton yang sama, namun jumlah neutron berbeda.
Kapasitas kapasitor	: Perbandingan antara muatan yang disimpan kapasitor dengan beda potensial antara kedua keping kapasitor.
Kapasitor	: Komponen dasar elektronika yang berfungsi menyimpan muatan listrik.
Kerangka acuan	: Sumbu koordinat yang melekat pada suatu sistem dan relatif terhadap suatu kedudukan yang diamati.
Kerangka acuan inersial	: Suatu kerangka acuan yang berada dalam keadaan diam atau bergerak terhadap acuan lainnya dengan kecepatan tetap pada suatu garis lurus.
Kerangka acuan non-inersial	: Kerangka acuan yang bergerak dipercepat.
Kisi	: Penghalang cahaya yang mempunyai banyak celah.
Kuat medan listrik	: Gaya Coulomb yang bekerja pada satu satuan muatan listrik yang berada di titik medan listrik.
Medan listrik	: Tempat (daerah) di sekitar muatan yang masih dipengaruhi oleh gaya listrik.
Medan magnet	: Ruang di sekitar magnet sehingga magnet lain atau benda lain masih mudah dipengaruhi gaya magnet.

Moderator	: Komponen reaktor nuklir yang berfungsi untuk menurunkan energi neutron cepat menjadi energi neutron termal.
Modulus bulk	: Sifat yang menentukan sejauh mana elemen medium berubah volumenya ketika tekanan diperbesar atau diperkecil.
Nada	: Bunyi yang frekuensinya beraturan.
Optik fisis	: Bagian optik yang membahas tentang hakikat cahaya sebagai gelombang elektromagnetik dan sifat-sifatnya.
Optik geometri	: Bagian optik yang membahas cahaya yang merambat lurus seperti perambatan cahaya setelah dipantulkan atau dibiarkan.
Optik kuantum	: Bagian optik yang membahas hakikat cahaya sebagai partikel dan interaksinya dengan partikel lain.
Osiloskop (CRO)	: Alat yang digunakan untuk mengukur tegangan bolak-balik.
Panjang gelombang	: Jarak yang ditempuh benda selama satu periode.
Pencampuran warna aditif	: Diperoleh dengan cara menjatuhkan beberapa berkas cahaya primer pada layar putih.
Pencampuran warna subtraktif	: Diperoleh dengan cara mencampurkan beberapa cat berwarna.
Pendingin reaktor	: Komponen reaktor nuklir yang berfungsi memindahkan panas dari pendingin primer ke pendingin sekunder.
Percobaan Melde	: Percobaan untuk menyelidiki kecepatan rambat gelombang transversal pada dawai atau senar.
Periode	: Waktu yang diperlukan untuk melakukan satu kali getaran atau satu panjang gelombang.
Perisai	: Komponen reaktor nuklir yang berfungsi untuk menahan radiasi agar tidak menyebar pada lingkungan.
Perubahan fisis	: Perubahan yang langsung dapat diamati, tanpa menghasilkan zat baru.
Pipa organa	: Pipa yang di dalamnya berupa kolom udara sebagai alat untuk menghasilkan bunyi.
Pipa organa terbuka	: Pipa organa yang kedua ujungnya terbuka.
Pipa organa tertutup	: Pipa organa yang salah satu ujungnya tertutup, sedangkan ujung yang lain terbuka.
Polarimeter	: Alat untuk mengukur sudut putaran bidang polarisasi.
Polarisasi	: Pengutuban gelombang.
Postulat Bohr	: Elektron mengorbit inti atom dalam lintasan-lintasan tertentu, dan dalam keadaan stasioner. Jika atom menyerap energi sebesar beda tingkat energi dalam atau elektronnya berpindah dari orbit dalam ke orbit luar maka atom dalam keadaan tereksitasi.

Potensial listrik	: Besarnya usaha yang diperlukan untuk memindahkan satu satuan muatan listrik dari jarak tak terhingga ke titik tertentu.
Prisma	: Merupakan benda bening (transparan) yang terbuat dari bahan gelas yang dibatasi oleh dua bidang permukaan yang membentuk sudut tertentu.
Radioaktivitas	: Peristiwa terjadinya sinar radioaktif.
Radiometer	: Alat yang digunakan untuk membuktikan bahwa warna hitam merupakan penyerap dan pemancar radiasi yang baik.
Rangkaian induktif	: Rangkaian arus listrik bolak-balik yang hanya terdiri dari satu buah induktor murni.
Rangkaian kapasitif	: Rangkaian arus listrik bolak-balik yang hanya terdiri dari satu buah kapasitor murni.
Rangkaian resistif	: Rangkaian arus listrik bolak-balik yang hanya terdiri dari satu buah resistor murni.
Reaksi disintegrasi	: Reaksi yang disebabkan karena inti atom ditembak dengan suatu partikel, sehingga terjadi ketidakstabilan.
Reaksi fisi	: Reaksi inti berat yang menghasilkan inti baru (lebih ringan), partikel-partikel kecil, dan energi yang besar.
Reaksi fisi berantai	: Reaksi fisi (pembelahan inti) yang akan menghasilkan jumlah neutron yang lebih banyak, menghasilkan energi yang lebih besar dan berlangsung secara terus-menerus.
Reaksi fusi	: Reaksi penggabungan inti-inti atom ringan menjadi inti atom yang lebih berat disertai dengan timbulnya energi yang besar.
Reaksi pelapukan	: Merupakan reaksi inti atom yang disebabkan karena inti atom memancarkan partikel-partikel.
Reaktor daya	: Reaktor nuklir yang dipergunakan sebagai sumber daya atau energi.
Reaktor nuklir	: Merupakan tempat untuk terjadinya reaksi nuklir dan mengendalikannya.
Refleksi	: Pemantulan gelombang.
Refraksi	: Pembiasan gelombang.
Sakarimeter	: Polarimeter yang dipakai untuk mengukur konsentrasi gula dalam larutan.
Simpangan	: Jarak kedudukan titik yang bergetar pada suatu saat dari titik setimbangnya.
Sinar katode	: Merupakan aliran elektron yang keluar dari katode dan menuju ke anode.
Sinar radioaktif	: Sinar yang dipancarkan secara spontan oleh inti atom yang

	tidak stabil.
Sinar-X	: Merupakan gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh anode dalam tabung hampa yang ditumbuk oleh elektron bertenaga tinggi dari katode.
Solenoida	: Kumparan yang lilitannya saling berdekatan.
Sonometer	: Alat yang digunakan untuk menentukan cepat rambat gelombang pada dawai.
Spektrometer	: Alat untuk menentukan panjang gelombang elektromagnetik yang dipancarkan berdasarkan spektrumnya.
Spektrum absorpsi	: Spektrum yang sekilas tampak seperti spektrum kontinu, akan tetapi jika diamati dengan teliti maka akan terdapat beberapa garis gelap.
Spektrum diskontinu	: Spektrum yang dihasilkan oleh gas yang berpijar pada tekanan rendah.
Spektrum emisi	: Spektrum yang dihasilkan oleh suatu zat yang memancarkan gelombang elektromagnetik.
Spektrum kontinu	: Spektrum yang terdiri atas cahaya dengan semua panjang gelombangnya.
Spektrum pita	: Spektrum yang terjadi dihasilkan oleh gas molekular.
Sudut deviasi	: Sudut apit yang merupakan perpanjangan sinar bias terakhir dengan sinar datang mula-mula.
Sudut dispersi	: Sudut yang dibentuk oleh sinar merah dan sinar ungu setelah keluar dari prisma.
Sudut pembias	: Sudut antara bidang pembias.
Sudut polarisasi	: Sudut datang yang menyebabkan sinar pantul terpolarisasi.
Superposisi gelombang	: Gabungan beberapa gelombang menjadi satu gelombang.
Susunan prisma akhromatik	: Susunan prisma yang dispersi totalnya sama dengan nol.
Susunan prisma pandang lurus	: Susunan prisma yang berguna untuk membuat sudut deviasi sinar monokromatik sama dengan nol.
Susut massa (defek massa)	: Selisih antara massa sebuah inti atom dengan jumlah massa proton dan neutron yang menyusunnya.
Tabung perlucutan	: Merupakan tabung kaca yang berisi gas dan dua elektrode, yaitu katode dan anode yang dihubungkan dengan tegangan tinggi.
Taraf intensitas bunyi	: Suatu besaran yang digunakan untuk mengukur kuat bunyi.
Tegangan bolak-balik	: Tegangan yang berubah bolak-balik secara terus-menerus (periodik).
Tegangan listrik bolak-balik efektif	: Nilai tegangan arus AC yang memberikan efek panas yang

	sama dengan panas yang dihasilkan listrik arus searah.
Teori kuantum Max Planck	: Energi berbentuk paket-paket yang disebut dengan kuantum, atau disebut pula bahwa energi bersifat diskret.
Teori relativitas	: Teori yang mempelajari hubungan antara benda-benda dalam suatu kerangka acuan.
Teras reaktor	: Komponen reaktor nuklir yang berfungsi sebagai tempat bahan bakar.
Toroida	: Solenoida yang melengkung membentuk lingkaran.
Ultrasonik	: Bunyi yang frekuensinya lebih besar dari 20.000 Hz.
Waktu paruh	: Waktu yang diperlukan unsur radioaktif untuk meluruh hingga jumlah intinya tinggal separuh.
Warna komplementer	: Warna yang terjadi saat dua warna yang digabungkan akan menghasilkan warna putih.
Warna primer	: Merupakan warna gabungan (kombinasi) dari warna spektral.
Warna primer aditif	: Merupakan warna gabungan dua warna spektral secara aditif.
Warna primer subtraktif	: Merupakan warna gabungan dari dua warna primer aditif.

Kunci Jawaban

Bab 1

- D
- D
- C
- C
- E
- E

Esai

- 3/5
- a. $8 \times 10^{-2} \text{ Wm}^{-2}$
b. $0,8\pi$ watt
- 680 Hz
- 40 dB
- 200 Hz; 600 Hz

Bab 2

- B
- A
- E
- C
- E
- B
- B
- B
- D

Esai

- 2d
- $3,5 \times 10^{-8} \text{ m}$
- $8,3 \mu\text{F}$; 120 V
- 0,6C
- 1,75 kV

Bab 3

- D
- B
- C
- D
- E
- A
- C
- B
- B

Esai

- F1 : F2 = 1 : 8
- 10^{-4} N
- 0,32 V
- berlawanan arah dengan kecepatan v

- a. 10 Hz;
b. 0,5 V

Bab 4

- B
- A
- D
- D
- E
- B
- E
- C
- A

Esai

- a. 25 ohm;
b. -53o;
c. $I = (0,48\sin(200t+53o))\text{A}$
- $500/\pi$ Hz
- 0,8 Hz
- $500/\pi$ ohm; $0,24\pi \sin(100\pi t+1/2\pi)\text{A}$
- 10 mA dan mA

Semester 1

- D
- A
- ?
- C
- E
- D
- E
- ?
- B
- D
- B
- B
- ?
- B
- D
- B
- A
- C
- C
- B
- E

Esai

- a. 0,22 A;
b. 19,36 W
- $3\pi \times 10^{-5} \text{ Wbm}^{-2}$
- $(k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2})$
- $2,64 \times 10^{-6} \text{ m}$
- 1.100 Hz; 3.300 Hz; 9.900 Hz

Bab 5

- | | |
|------|-------|
| 1. C | 11. B |
| 3. D | 13. D |
| 5. B | 15. C |
| 7. D | 17. C |
| 9. E | 19. D |

Esai

- $1,71 \times 10^{30}$ foton/s
- $4,38 \times 10^{17}$ foton
- 2,5 volt
- 2,48 eV
- 1,03 eV

Bab 6

- | | |
|------|-------|
| 1. A | 11. E |
| 3. A | 13. D |
| 5. D | 15. B |
| 7. A | 17. B |
| 9. A | 19. C |

Esai

- $\lambda_{\text{terpanjang}} = 1.215 \overset{\circ}{\text{A}}$, $\lambda_{\text{terpendek}} = 912 \overset{\circ}{\text{A}}$
- 4.340 $\overset{\circ}{\text{A}}$
- 13,6 eV
- Rn-86
- ${}_{26}^{\text{Fe}}$

Bab 7

- | | |
|------|-------|
| 1. C | 11. C |
| 3. B | 13. A |
| 5. D | 15. C |
| 7. C | 17. C |
| 9. D | 19. A |

Esai

- 0,4c
- 0,141c
- 0,986c
- $3,33 \times 10^{-6}$ s
- 2,12m0; 0,33c

Bab 8

- | | |
|------|-------|
| 1. E | 11. B |
| 3. A | 13. B |
| 5. C | 15. B |
| 7. D | 17. A |
| 9. B | 19. D |

Esai

- 23.800 km
- 6,04 tahun]
- 23,8 MeV
- 8,78 hari
- 5,33 MeV

Semester 2

- | | |
|-------|-------|
| 1. C | 21. E |
| 3. B | 23. A |
| 5. D | 25. C |
| 7. A | 27. C |
| 9. A | 29. D |
| 11. A | 31. D |
| 13. C | 33. C |
| 15. B | 35. B |
| 17. D | 37. D |
| 19. B | 39. D |

Esai

- 1,03 eV
- 13,6 eV
- 2,12m0; 0,33c
- 6,04 tahun
- 5,33 MeV

Indeks

A

alfa 71, 247, 248
atom 92, 93, 95, 101, 126,
183, 245, 246, 247, 248,
249, 250, 251, 252, 253, 254,
255, 256, 258, 259, 260, 261,
262, 263, 264, 265, 266, 269,
270, 271, 272, 273, 313, 314

B

-

C

Curie 183

D

Difraksi Cahaya 1, 53, 237

E

emisivitas 226, 227

F

-

G

gelombang bunyi 1, 2, 3, 44, 45, 46,
47, 64, 65, 67, 69, 70, 71, 72,
74, 75, 73, 76, 79, 81, 281
gelombang elektromagnetik 227,
230, 232, 233, 234, 236,
239, 277, 249, 253, 254, 269
gelombang ultrasonik 72, 83, 84

H

hukum Coulomb 94, 96, 146, 248

I

Interferensi Cahaya 1, 47

J

-

K

Kuat Bunyi 1, 71, 87

L

listrik statis 91, 92, 93, 126, 190,

M

-

N

-

O

-

P

Polarisasi Cahaya 1, 58

Q

-

R

resonansi 211

S

-

T

Taraf Intensitas Bunyi 1, 80, 83
Tinggi Nada 1, 71, 87

U

Uranium 110

V

-

W

Warna Bunyi 1, 71, 74

X

-

Y

-

Z

-



Pernahkah Anda menggunakan telepon, mendengarkan radio, melihat televisi, atau mencari berita melalui internet? Tentunya Anda pernah menggunakan paling tidak satu dari peralatan tersebut.

Apakah peralatan tersebut telah ada sejak dahulu? Tentu tidak. Alat tersebut dahulu bermula dari ditemukannya alat-alat yang sangat sederhana, jauh berbeda dari alat yang ada sekarang. Manusia yang diberi akal selalu mengembangkan daya pikirnya yang kreatif dengan membuat alat-alat yang sederhana kemudian memberikan tambahan-tambahan menjadi alat yang sedikit lebih kompleks, hingga sekarang menjadi alat yang sangat kompleks. Misalnya zaman dahulu orang berkomunikasi dengan bahasa tubuh sebagai isyarat. Sekarang orang berkomunikasi menggunakan internet pada jarak yang jauh bahkan lintas negara.

Perkembangan peralatan yang canggih tersebut didasarkan pada perkembangan ilmu-ilmu fisika. Peralatan yang sangat kompleks tersebut merupakan penerapan dari ilmu fisika.

Kita sebagai bangsa yang berkembang harus memacu diri kita untuk memajukan bangsa kita menjadi bangsa yang maju dengan meningkatkan kualitas penguasaan kita terhadap ilmu pengetahuan dan teknologi sebagai syarat mutlak bagi bangsa yang maju. Salah satu langkahnya yaitu dengan mempelajari ilmu-ilmu fisika.

Buku ini kami susun sebagai jembatan Anda dalam memahami ilmu-ilmu fisika dengan menyertakan beberapa instrumen pembelajaran, antara lain sebagai berikut.

1. Materi, yang di dalamnya memuat penjelasan tentang konsep-konsep fisika yang telah disesuaikan dengan standar isi yang telah digariskan.
2. Contoh soal, yang memberikan gambaran bagaimana menyelesaikan permasalahan-permasalahan fisika yang terkait dengan konsep fisika.
3. Eksperimen, yang membimbing Anda untuk menerapkan konsep-konsep fisika secara praktik.
4. Uji kemampuan, sebagai bahan evaluasi terhadap kemampuan Anda dalam menguasai materi.

Berpikirlah bahwa Anda mampu menguasai ilmu fisika dan berpikirlah bahwa Anda dapat memajukan bangsa kita dengan menguasai ilmu fisika sebagai dasar kemajuan teknologi modern. Dengan begitu Anda pasti mampu menguasainya!

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 22 Tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007 Tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran Yang Memenuhi Syarat Kelayakan Untuk Digunakan Dalam Proses Pembelajaran.

Harga Eceran Tertinggi (HET) Rp19.618,-

ISBN: 978-979-068-802-5 (no jilid lengkap)

ISBN: 978-979-068-811-7