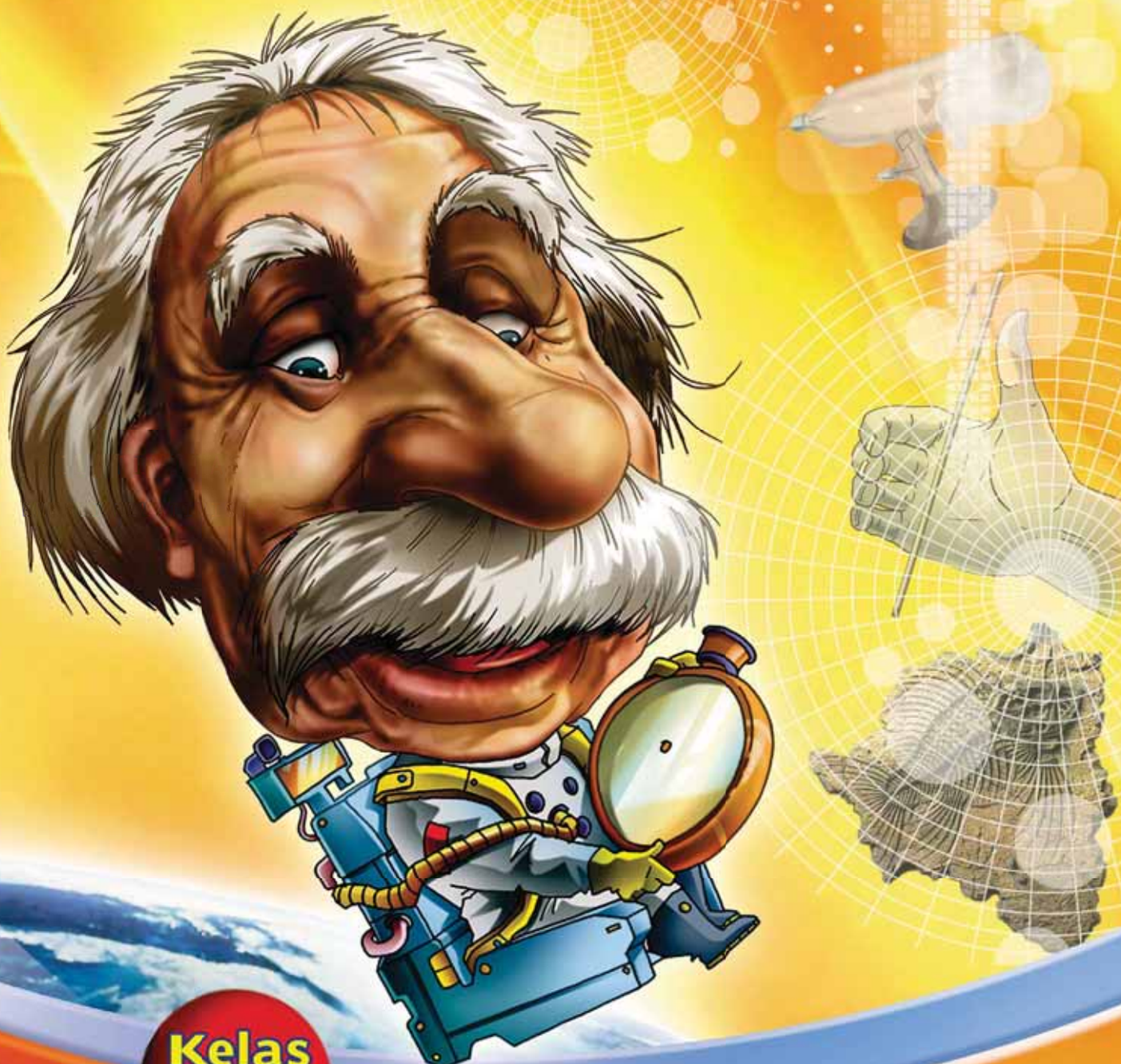
Siswanto . Sukaryadi

KOMPETENSI FISIKA



Kelas XII

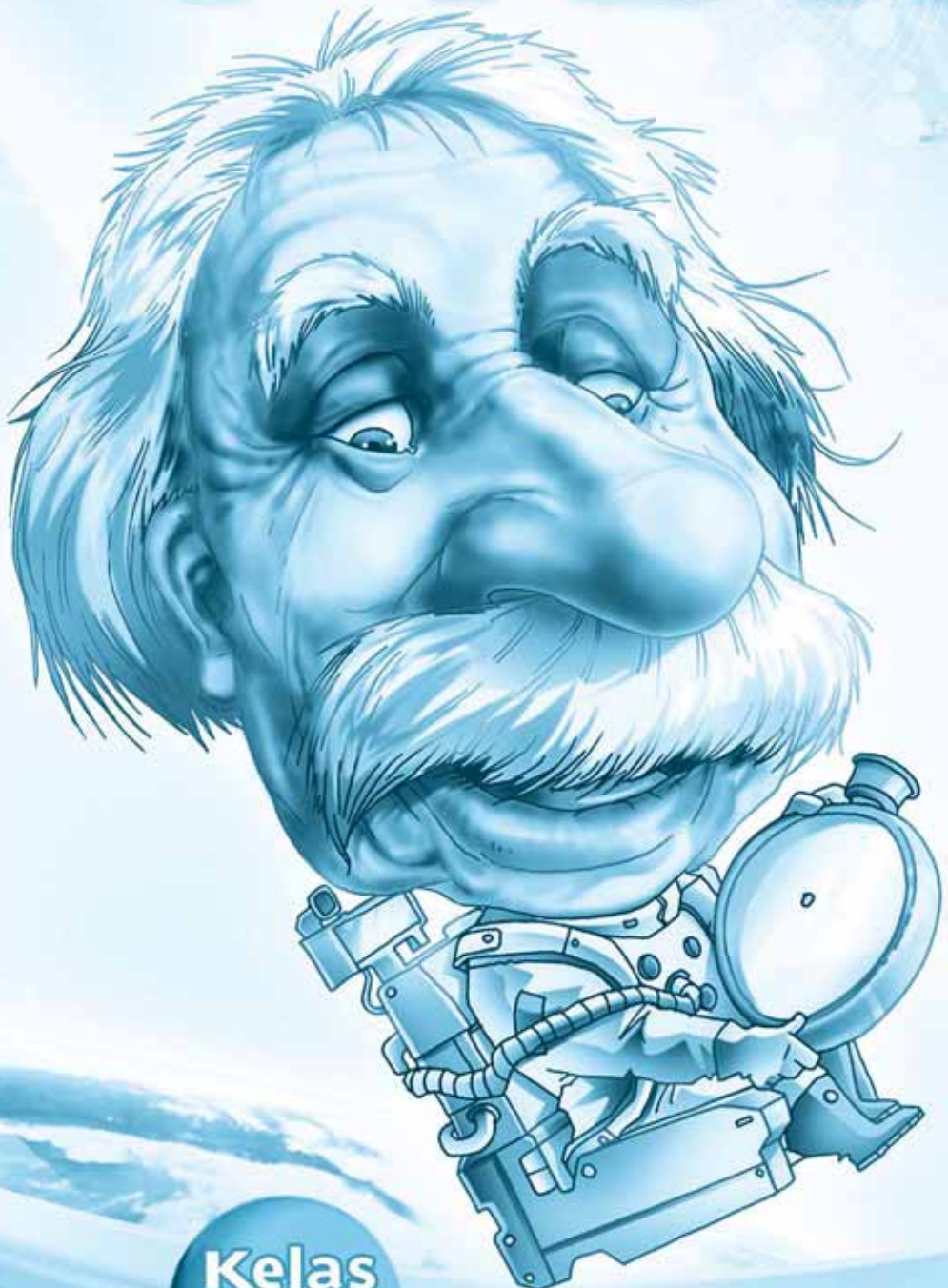
Untuk SMA/MA

PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Siswanto . Sukaryadi
KOMPETENSI FISIKA
Untuk SMA/MA
Kelas XII

Siswanto . Sukaryadi

KOMPETENSI FISIKA



Kelas XII

Untuk SMA/MA

PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional
Dilindungi Undang-undang

Fisika

Untuk SMA/MA Kelas X

Disusun oleh:
Siswanto, Sukaryadi

Editor : Intan Maharani
Ilustrator : Sigit Dwi Nugroho, Sunardi, Bambang Sugiarto
Setting/Layout : Yuniar Adhi Anggoro, Ika Kristianingsih, Sri Rahayu, Ibnu Wibowo

530.07
SIS SISWANTO
f Fisika : Untuk SMA/MA Kelas X / disusun Siswanto, Sukaryadi ; editor, Intan Maharani. — Jakarta : Pusat Perbukuan, Departemen Pendidikan Nasional, 2009.
v, 218 hlm. : ilus. : 25 cm.

Bibliografi : hlm.218
Indeks : 213
ISBN 978-979-068-233-7 (no.jld.lengkap)
ISBN 978-979-068-236-8 (Jil 3)

1.Fisika-Studi dan Pengajaran I. Judul II. Sukaryadi

Buku ini telah dibeli hak ciptanya oleh
Departemen Pendidikan Nasional dari
Penerbit CV Teguh Karya

Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional
Tahun 2008

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 2008, 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 22 Tahun 2007 tanggal 25 Juni 2007.

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, Februari 2009
Kepala Pusat Perbukuan

Kata Pengantar

Fisika, *I Like It!*

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi saat ini sangat cepat. Perkembangan teknologi, terutama teknologi informasi, sangat terbantu oleh keberadaan ilmu fisika. Banyak peralatan berteknologi canggih memanfaatkan ilmu fisika dalam perangkaiannya. Seperti misalnya teknologi informasi yang berkembang saat ini.

Dewasa ini, melalui teknologi informasi kita dapat mengakses berbagai informasi, baik berupa tulisan maupun gambar. Dunia semakin tidak ada batasnya. Hanya dalam hitungan menit, bahkan detik, kita dapat mengetahui kejadian penting di dunia luar. Kita dapat menyaksikan pertandingan sepak bola yang sedang berlangsung di luar negeri melalui televisi. Dengan menggunakan telepon genggam (*hand phone*), kita dapat berkomunikasi dengan saudara atau teman yang keberadaannya di luar pulau yang jauh dari keberadaan kita. Kita dapat mengetahui perkembangan dunia dengan cepat melalui internet.

Prinsip kerja televisi, *hand phone,* dan internet adalah berdasarkan konsep gelombang elektromagnetik. Sungguh luar biasa bukan, sumbangan fisika dalam mengembangkan teknologi khususnya teknologi informasi?

Inilah salah satunya yang menjadikan kita bangga belajar menguasai ilmu fisika. Ilmu fisika sangat berguna dalam kehidupan bermasyarakat, berbangsa, dan bernegara. Kamu dapat membayangkan betapa terhambatnya komunikasi pemerintahan tanpa adanya telepon. Betapa tertinggalnya suatu negara tanpa bisa beromunikasi secara cepat dan mudah dengan negara tetangga atau negara lain. Dan itu semua tentu memanfaatkan teknologi komunikasi dan informasi canggih, yang tentu saja berkat bantuan ilmu fisika.

Jadi, fisika adalah pelajaran yang sangat penting untuk dipelajari dan sangat menarik untuk dipahami dan dikembangkan. Kamu dapat belajar fisika dengan mudah melalui kegiatan-kegiatan seperti diskusi, observasi, eksperimen, dan latihan pemecahan masalah yang tersaji di dalam buku ini. Dengan kegiatan-kegiatan tersebut, pelajaran fisika menjadi sangat menarik sehingga menumbuhkan motivasi belajar dan mempermudah pemahaman konsep. Buku ini berharap kelak kamu menjadi kader bangsa yang kreatif dan inovatif. ”Inilah yang menjadikan **aku suka fisika**,” kata temanmu yang aktif menekuni bidang fisika ketika ikut olimpiade. Selamat belajar, semoga sukses!

Yogyakarta, Mei 2007

Penulis

Petunjuk Penggunaan Buku bagi Siswa

Buku ini memuat rubrikasi seperti diuraikan secara singkat berikut. Bacalah dengan cermat!

Judul Bab

Bagian ini berisi kompetensi dasar yang akan dibahas dalam setiap bab. Kompetensi dasar disajikan dalam bentuk dialog komik sehingga lebih familier dan menarik.

Gerbang dan Subbab

Sebelum masuk pada materi, kamu akan menjumpai **gerbang,** sebagai pembuka wacana. Di sini diinformasikan secara singkat materi yang akan dibahas pada bab tersebut. Untuk mempermudah pemahaman, kamu juga dipandu dengan kata-kata kunci. Selanjutnya disajikan materi utama yang dijabarkan ke dalam beberapa subbab.

Selengkapnya dapat kamu baca yang berikut ini.

Kerja Mandiri

Kerja mandiri merupakan pelatihan yang harus kamu kerjakan sendiri. Pelatihan ini untuk mengetahui pemahamanmu terhadap materi pokok.

Kerja Berpasangan

Kegiatan ini untuk dikerjakan bersama teman sebangku atau teman pilihanmu.

Kerja Kelompok

Kegiatan ini harus kamu laksanakan bersama kelompokmu. Kegiatan tersebut untuk memupuk rasa kebersamaan.

Uji Kompetensi

Rubrik ini berupa soal-soal latihan, bertujuan untuk mengetahui sejauh mana kompetensi yang kamu capai setelah mempelajari materi satu bab.

Sebaiknya Tahu

Rubrik ini memberikan pengetahuan tambahan yang berkaitan dengan materi.

Rangkuman

Berupa materi ringkas yang ada pada akhir materi. Rangkuman sangat membantumu dalam menguasai materi.

Praktikum

Melalui kegiatan ini kamu dilatih menjadi seorang peneliti andal.

Diskusi

Selain tersebut di atas, kamu juga dilatih menyampaikan pendapat melalui diskusi. Di sinilah kamu belajar berargumentasi dan berbicara kritis.

Soal Akhir Semester

Di sinilah kamu diuji kompetensimu setelah mengenyam pelajaran selama satu semester. Tunjukkan kemampuanmu dengan penuh percaya diri!

Daftar Isi

Copyright .....
Sambutan.....
Kata Pengantar.....
Petunjuk Penggunaan Buku bagSiswa v
Daftar Isi .....

Bab 1 Gelombang Mekanik
A. Pengertian GelombangMekanik 2
B. Persamaan GelombangBerjalan 4
C. Cepat Rambat GelombangTransversal 6
D. Gelombang Stasioner..... 8
E. Interferensi Gelombang..... 12
F. Layangan Gelombang..... 13
Soal-soal Uji Kompetensi..... 16

Bab 2 Bunyi
A. Gelombang Bunyi 20
B. Efek Doppler 31
C. Intensitas Bunyi 34
Soal-soal Uji Kompetensi..... 37

Bab 3 Cahaya Sebagai Gelombang Elektromagnetik
A. Cahaya 40
B. Dispersi Cahaya 41
C. Interferensi Cahaya 44
D. Difraksi Cahaya..... 46
E. Polarisasi Cahaya 49
F. Penerapan Cahaya dalamTeknologi 52
Soal-soal Uji Kompetensi..... 55

Bab 4 Listrik Statis
A. Muatan Listrik 58
B. Hukum Coulomb 60
C. Medan Listrik Statis..... 62
D. Garis-garis Medan Listrik 63
E. Hukum Gauss 64
F. Potensial Listrik 66
G. Kapasitor 68
Soal-soal Uji Kompetensi..... 76

Bab 5 Medan Magnetik Induksi
A. Medan Magnetik Induksi 80
B. Hukum Biot-Savart 83
C. Gaya Lorentz 86
Soal-soal Uji Kompetensi..... 92

Bab 6 Induksi Faraday dan Arus Bolak-balik
A. GGL Induksi 96
B. Penerapan Induksi Elektromagnetik..... 98
C. Tegangan danArus Sinusoidal 99

Diunduh dari BSE.Mahoni.com

D. Diagram Fasor 101
E. Rangkaian Arus Bolak-balik 102
F. Daya pada Rangkaian Arus Bolak-balik 109
Soal-soal Uji Kompetensi 113
Soal-soal Akhir Semester 1 116

Bab 7 Radiasi Benda Hitam

A. Benda Hitam 122
B. Hukum Pergeseran Wien 124
C. Hipotesa Planck 125
D. Penerapan Radiasi Benda Hitam 126
Soal-soal Uji Kompetensi 129

Bab 8 Fisika Atom

A. Atom 132
B. Sinar Katoda dan Model Atom Thomson 133
C. Model Atom Rutherford 134
D. Model Atom Bohr 135
E. Spektrum Atom Hidrogen 139
F. Atom Berelektron Banyak 142
Soal-soal Uji Kompetensi 149

Bab 9 Relativitas

A. Fisika Klasik 152
B. Transformasi Galileo 153
C. Percobaan Michelson-Morley dan Kegagalan Teori Eter 155
D. Postulat Einstein 157
E. Transformasi Lorentz 158
F. Aturan Penjumlahan Kecepatan 160
G. Kontraksi Panjang 162
H. Dilatasi Waktu 163
I. Momentum Relativistik 165
Soal-soal Uji Kompetensi 173

Bab 10 Inti Atom dan Radioaktivitas

A. Inti Atom 176
B. Radioaktivitas 180
C. Reaksi Inti 187
D. Reaksi Fisi dan Reaksi Fusi 189
Soal-soal Uji Kompetensi 193

Bab 11 Penerapan Radioaktif

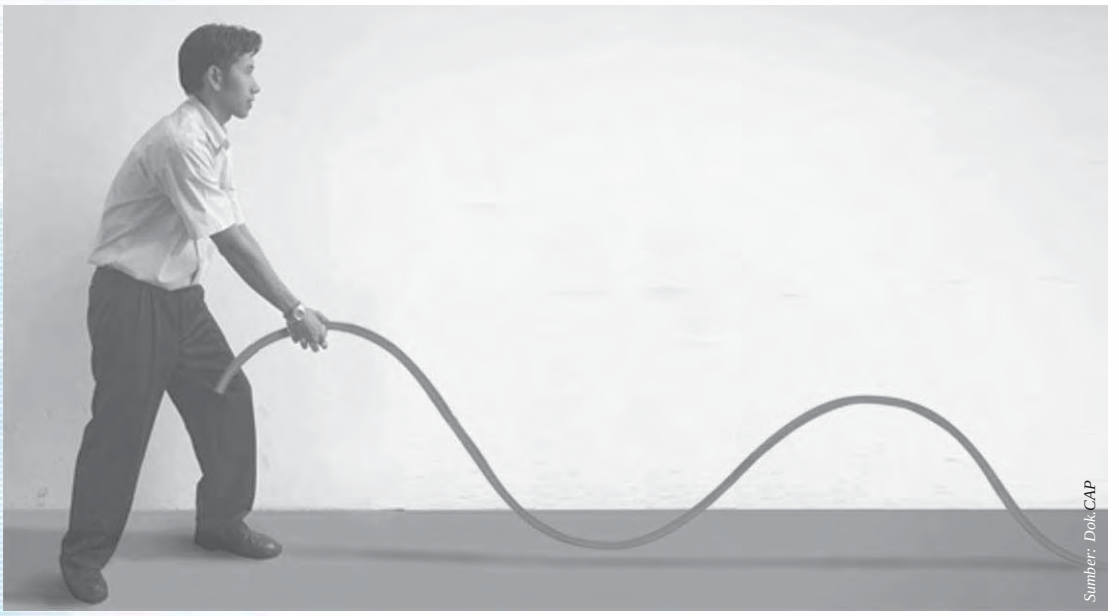
A. Reaktor Nuklir 196
B. Pemanfaatan Radioisotop 199
C. Dosis Radiasi 203
Soal-soal Uji Kompetensi 205
Soal-soal Akhir Semester 2 207

Glosarium 211
Indeks 213
Kunci Jawaban Soal Terpilih 216
Daftar Pustaka 218

BAB 1

GELOMBANG MEKANIK

Gerbang



Gambar 1.1 Tali yang digetarkan

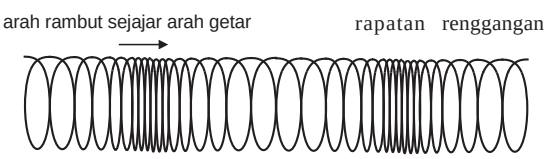
Pernahkah kamu bermain *slinky*? Coba kamu perhatikan rapatan dan renggangan pada *slinky* tersebut saat digetarkan. Ambillah seutas tali! Amatilah apa yang terjadi jika salah satu ujung tali kamu ikatkan pada suatu tiang kemudian ujung yang lain kamu getarkan! Tali dan *slinky* yang digetarkan akan menunjukkan gejala gelombang. Apakah gelombang itu? Untuk memahaminya pelajarilah pembahasan berikut!

Kata Kunci: Persamaan Gelombang Berjalan – Cepat Rambat Gelombang – Gelombang Stasioner – Interferensi Gelombang – Layangan Gelombang

A. Pengertian Gelombang Mekanik

Berdasarkan gambar 1.1, kita dapat melihat timbulnya gejala gelombang pada *slinky*. Gejala gelombang tersebut terjadi karena getaran yang merambat pada *slinky*. Dengan demikian, dapat diambil pengertian bahwa gelombang adalah getaran yang merambat.

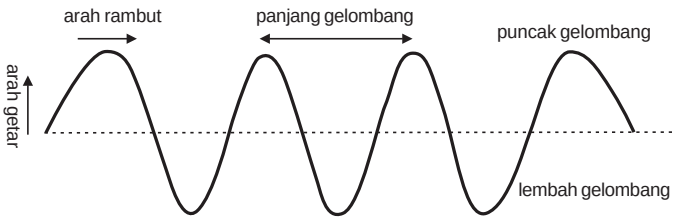
Gejala gelombang pada *slinky* maupun tali merupakan gejala gelombang yang sudah tidak asing lagi bagi kita. Gelombang yang terjadi pada contoh-contoh di atas merupakan contoh gelombang mekanik. Gelombang mekanik adalah gelombang yang memerlukan media untuk merambat.



Gambar 1.2 Gelombang longitudinal pada *slinky*

Berdasarkan arah rambat dan arah getarnya, gelombang dibedakan atas gelombang transversal dan gelombang longitudinal. Gelombang transversal adalah gelombang yang arah rambatnya tegak lurus dengan

arah getarnya. Contoh gelombang jenis ini adalah gelombang pada tali. Sedangkan gelombang longitudinal adalah gelombang yang memiliki arah rambat sejajar dengan arah getarnya. Contoh gelombang longitudinal adalah gelombang pada *slinky*.



Gambar 1.3 Gelombang transversal pada tali

Sebelum kita membahas lebih lanjut tentang konsep gelombang mekanik, akan lebih baik bila kita mengetahui istilah-istilah yang berhubungan dengan gelombang sebagai berikut.

1. Panjang Gelombang

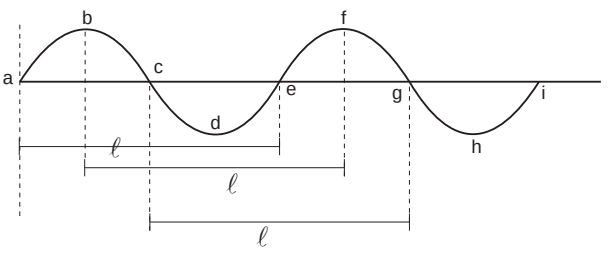
   Untuk memahami pengertian panjang gelombang, perhatikan gambar berikut.

   abc, efg adalah bukit gelombang

   cde, ghi adalah lembah gelombang

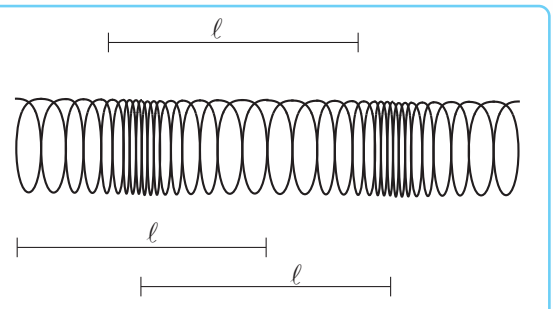
   titik b, f adalah puncak gelombang

   titik d, h adalah dasar gelombang



Gambar 1.4 Panjang gelombang

   abcde, bcdef, cdefg, dan seterusnya adalah satu gelombang. Panjang a–e, b–f, c–g, d–h, dan seterusnya adalah panjang satu gelombang atau sering disebut panjang gelombang (λ = dibaca lamda). Pada gambar di atas maka $\lambda = \ell$. Untuk gelombang longitudinal, panjang satu gelombang adalah panjang satu rapatan dan satu regangan atau jarak antardua rapatan yang berurutan atau jarak antara dua regangan yang berurutan seperti pada gambar 1.5 di samping!



Gambar 1.5 Gelombang longitudinal

2. Periode gelombang (T), yaitu waktu yang diperlukan untuk menempuh satu gelombang.
3. Frekuensi gelombang (f), yaitu jumlah gelombang tiap sekon.
4. Cepat rambat gelombang (v), yaitu jarak yang ditempuh gelombang tiap sekon.

   Secara matematis, cepat rambat gelombang dirumuskan:

$$v = \frac{s}{t} \qquad \ldots (1.1)$$

   Jika $s = \lambda$ maka persamaan 1.1 menjadi:

$$v = \frac{\lambda}{t} \text{ atau } v = \lambda \, . \, f$$

Keterangan:

s : jarak yang ditempuh dalam t sekon

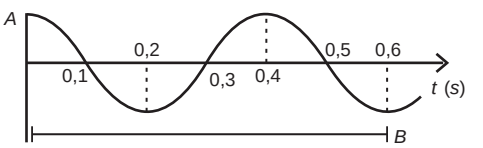
t : periode ($t = T$)

Supaya kamu lebih memahami penjelasan di atas, cobalah perhatikan contoh soal berikut ini!

Contoh Soal

Gelombang merambat pada tali seperti gambar berikut. Berdasarkan gambar tersebut tentukan:

a. panjang gelombang,
b. periode,
c. cepat rambat gelombang.



Penyelesaian:

Diketahui: $n = \frac{3}{2}$

$t = 0{,}6$ sekon

Ditanyakan: a. λ = . . . ?

b. T = . . . ?

c. v = . . . ?

Jawab:

a. Dari gambar terlihat bahwa dari titik A ke B terbentuk $\frac{3}{2}$ gelombang sehingga

$\frac{3}{2}\lambda = 30$

$\lambda = \frac{2}{3} \cdot 30 = 20$ cm

b. $T = \frac{0{,}6}{\frac{3}{2}} = 0{,}4$ sekon

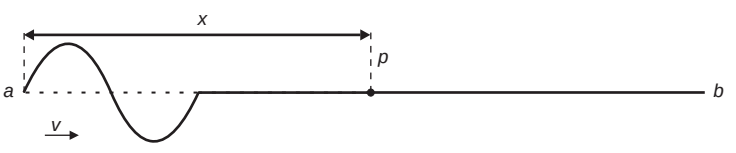
c. $v = \frac{\lambda}{T} = \frac{20\text{ cm}}{0{,}4\text{ s}}$

$= 50$ cm/s

Berdasarkan pembahasan di atas kita dapat mengetahui tentang gelombang secara umum dan istilah yang berkaitan dengan gelombang serta pengertian gelombang mekanik. Untuk memahami lebih jauh tentang gelombang mekanik, marilah kita pelajari pembahasan berikut!

B. Persamaan Gelombang Berjalan

Perhatikan gambar 1.6 di bawah ini! Gambar tersebut menunjukkan gelombang transversal pada seutas tali *ab* yang cukup panjang. Pada ujung *a* kita getarkan sehingga terjadi rambatan gelombang. Titik *p* adalah suatu titik yang berjarak *x* dari *a*.



Gambar 1.6 Gelombang yang merambat pada seutas tali

Misalnya *a* digetarkan dengan arah getaran pertama kali ke atas, maka persamaan gelombangnya adalah:

$$y = A \sin \omega t \quad \ldots (1.2)$$

Getaran ini akan merambat ke kanan dengan kecepatan *v,* sehingga getaran akan sampai di *p* setelah selang waktu $\frac{x}{v}$. Berdasarkan asumsi bahwa getaran berlangsung konstan, persamaan gelombang di titik *p* adalah:

$$y_p = A \sin \omega t_p \quad \ldots (1.3)$$

Selang waktu perjalanan gelombang dari *a* ke *p* adalah $\frac{x}{v}$. Oleh karena itu, persamaan 1.3 dapat dituliskan sebagai berikut.

$$y_p = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad \ldots (1.4)$$

Dengan $\omega = 2\pi f$ dan $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ serta $v = f \cdot \lambda$, persamaan 1.4 dapat kita jabarkan menjadi:

$$y_p = A \sin (\omega t - kx) \quad \ldots (1.5)$$

Jika gelombang merambat ke kiri maka titik *p* telah mendahului *a* dan persamaan gelombangnya adalah:

$$y_p = A \sin (\omega t + kx) \quad \ldots (1.6)$$

Jika titik *a* digetarkan dengan arah getaran pertama kali ke bawah, maka amplitudo (*A*) negatif.

Dengan demikian, persamaan gelombang berjalan dapat dituliskan sebagai berikut.

Persamaan Gelombang Berjalan

$$y_p = \pm A \sin (\omega t \pm kx) \quad \ldots (1.7)$$

Keterangan:

y_p : simpangan (m)
A : amplitudo (m)
k : bilangan gelombang = $\frac{2\pi}{\lambda}$
v : cepat rambat gelombang (m/s)
λ : panjang gelombang (m)
t : waktu (s)
x : jarak (m)
ω : kecepatan sudut (rad/s) = $2\pi f = \frac{2\pi}{T}$
f : frekuensi (Hz)
T : periode ($\frac{1}{\text{s}}$)

Contoh Soal

Fungsi gelombang pada suatu medium dinyatakan sebagai:
$y = 0{,}1 \sin (5t - 2x)$, dengan x dan y dalam meter dan t dalam sekon. Tentukanlah frekuensi dan panjang gelombang tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: gelombang berjalan, $y = 0{,}1 \sin (5t - 2x)$

Ditanyakan: $f = \ldots?$

$\lambda = \ldots?$

Jawab:

Dengan menggunakan persamaan 1.5 dapat kita ketahui bahwa: $A = 0{,}1$ m dan $\omega = 2\pi f = 5$, sehingga:

$$f = \frac{5}{2\pi} \text{ Hz}$$

Dengan persamaan 1.5 kita ketahui bahwa $k = 2$, sehingga:

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

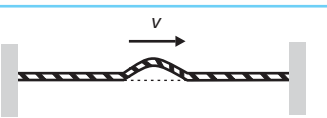
$$\lambda = \frac{2\pi}{k}$$

$$\lambda = \pi \text{ m}$$

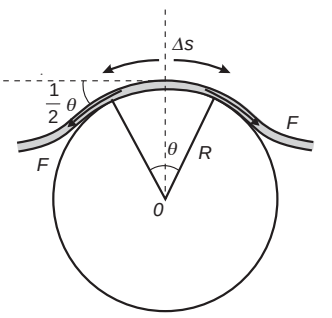
C. Cepat Rambat Gelombang Transversal

Pernahkah kamu memerhatikan senar gitar yang sedang dipetik? Pada senar gitar yang dipetik akan tampak ”gangguan” atau disturbansi yang merambat ke kedua arah. Tiap gangguan tersebut disebut pulsa transversal. Disebut demikian karena arah gerak partikel-partikel senar tegak lurus dengan arah rambat pulsa.

Gelombang pada senar yang di petik tersebut merambat dengan kecepatan v. Berikut ini kita akan membahas cara menentukan besarnya v tersebut. Perhatikan gambar berikut 1.7a dan 1.7b di samping!



Gambar 1.7a Gelombang yang bergerak dengan laju v sepanjang senar gitar



Gambar 1.7b Suatu segmen kecil tali senar yang panjangnya Δs bergerak dalam busur melingkar dengan jari-jari R

Gambar 1.7a menunjukkan pulsa yang menjalar sepanjang tali senar gitar dengan laju v ke kanan. Pulsa gelombang tersebut dianggap kecil dibandingkan panjang senar gitar. Pulsa ini menimbulkan tegangan tali (F) yang konstan sepanjang senar, seperti terlihat pada gambar 1.7b. Pada gambar 1.7b menunjukkan segmen senar sepanjang Δs membentuk busur suatu lingkaran berjari R dan bergerak dengan kelajuan v.

Berdasarkan percepatan sentripetal $a_s = \frac{v^2}{R}$ dan sudut pusat $\theta = \frac{a_s}{R}$. Komponen F pada arah mendatar saling meniadakan resultan komponen F pada arah vertikal:

$F_R = 2F \sin \frac{1}{2}\theta$, untuk θ kecil maka $F_R = 2F \frac{1}{2}\theta = F\theta$.

Jika μ adalah massa persatuan panjang senar maka untuk segmen senar pada gambar 1.7b berlaku:

$$\mu = \frac{m}{\Delta s} = \frac{m}{\Delta R} \text{ atau } m = \mu \theta R$$

Jika resultan komponen F pada arah vertikal: (F_R) = gaya radial maka:

$$F\theta = m\frac{v^2}{R}$$

$$F\theta = \mu\,\theta R\frac{v^2}{R}$$

$$F = \mu v^2 \text{ atau}$$

$$v^2 = \frac{F}{\mu}$$

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

Keterangan:

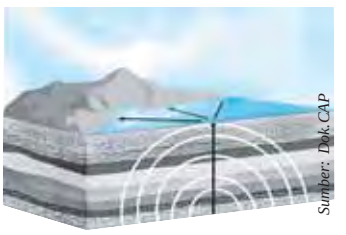
v : laju gelombang (m/s)

F : tegangan tali (N)

μ : massa persatuan panjang tali (kg/m)

Sebaiknya Tahu

Gempa Bumi



Sumber: Dok.CAP

Gambar 1.8 Rambatan gelombang gempa

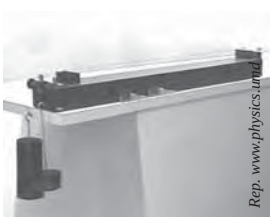
Gempa bumi merupakan gejala perambatan energi gelombang dari pusat gempa menuju ke permukaan bumi.

Titik pusat gempa bumi di dalam perut bumi disebut *hiposentrum*. Sedangkan pusat gempa di permukaan bumi yang tegak lurus dengan hiposentrum disebut *episentrum*.

Contoh Soal

Suatu tali dihubungkan melalui katrol dan ujungnya diberi beban 0,2 kg kemudian digetarkan. Jika panjang tali 3 m dari massa tali 60 gram, tentukan laju gelombang pada tali! (g = 10 m/s^2)

Penyelesaian:



Rep. www.physics.umd

Diketahui: m_b = 0,2 kg

ℓ = 3 m

m_t = 60 gram

g = 10 m/s

Ditanyakan: v = . . .?

Jawab:

$F = mg = 0{,}2 \cdot 10 = 2$ N

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

$$\mu = \frac{0{,}06\text{ kg}}{3\text{ m}} = 0{,}02 \text{ kg/m}$$

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

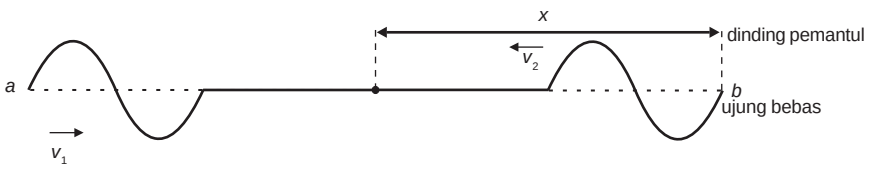
$$v = \frac{2}{0{,}02} = 10 \text{ m/s}$$

D. Gelombang Stasioner

Gelombang Stasioner

Sejauh ini kita telah membahas rambatan gelombang pada medium dengan jarak yang tidak terbatas, sehingga rambatannya pun kita anggap berjalan searah secara terus-menerus. Jika gelombang telah mengalami pemantulan, sementara sumber gelombang masih terus memberikan pulsa terus-menerus maka akan terjadi pertemuan antara gelombang datang dan gelombang pantul. Baik gelombang datang maupun gelombang pantul dapat kita anggap koheren. Pertemuan ini akan menghasilkan pola gelombang yang disebut gelombang stasioner.

Gelombang stasioner terjadi jika dua buah gelombang yang koheren dengan arah rambat yang saling berlawanan bertemu pada suatu titik, sehingga mengakibatkan terjadinya interferensi antara kedua gelombang tersebut. Gambar 1.9 menunjukkan gejala terbentuknya gelombang stasioner.



Gambar 1.9 Pertemuan gelombang datang dan gelombang pantul akan menghasilkan pola gelombang stasioner

Misalnya dua buah gelombang berjalan yang bergerak berlawanan arah akibat pantulan, masing-masing gelombang memiliki persamaan:

$$y_1 = A \sin (\omega t + kx) \quad \ldots (1.8)$$

$$y_2 = A \sin (\omega t - kx) \quad \ldots (1.9)$$

Gelombang tersebut akan bertemu pada suatu titik dan menimbulkan gejala interferensi gelombang dan menghasilkan gelombang stasioner.

Jika kedua persamaan ini kita jumlahkan, untuk gelombang stasioner yang terjadi memiliki persamaan:

$$y_s = 2A \cos kx \sin \omega t \quad \ldots (1.10)$$

Keterangan:

x : jarak titik dari ujung pantulan

y_s : simpangan gelombang stasioner

Persamaan 1.10 adalah persamaan gelombang stasioner pada ujung bebas. Dari persamaan tersebut dapat kita lihat bahwa gelombang stasioner ini memiliki amplitudo sebesar:

$$A_s = 2A \cos kx \quad \ldots (1.11)$$

Keterangan:

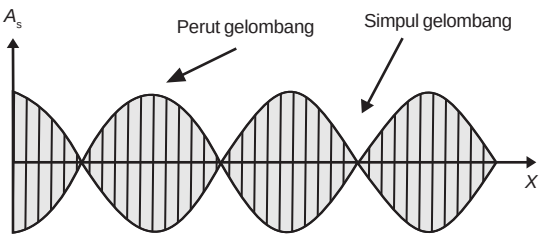
A_s : ampiltudo gelombang stasioner (m)

A : amplitudo gelombang berjalan (m)

k : bilangan gelombang = $\frac{2\pi}{\lambda}$

x : jarak suatu titik ke titik pantul (m)

Pola gelombang stasionernya dapat kita lihat pada gambar berikut.



Gambar 1.10 Pola gelombang stasioner

Berdasarkan persamaan 1.11 di atas, dapat ditentukan letak terjadinya interferensi konstruktif dengan melihat amplitudo gelombang stasionernya. Interferensi konstruktif akan terjadi pada perut gelombang. Pola pusat gelombang amplitudo gelombang stasionernya adalah maksimum. Nilai tersebut akan dicapai jika harga $\frac{2\pi x}{\lambda} = 0\pi, \pi, 2\pi, 3\pi,$ dan seterusnya.

Letak perut gelombang dari dinding pemantul adalah:

$$x = (n - 1)\ \frac{\lambda}{2} \qquad \ldots (1.12)$$

Keterangan:

n : 1, 2, 3, . . . atau perut ke 1, 2, 3, . . .

Interferensi destruktif akan terjadi pada simpul gelombang dengan amplitudo gelombang stasionernya adalah 0. Nilai tersebut akan dicapai jika harga $\frac{2\pi x}{\lambda} = \frac{1}{2}\pi, 1\frac{1}{2}\pi, 2\frac{1}{2}\pi, 3\frac{1}{2}\pi$ dan seterusnya. Letak simpul gelombang dari dinding pemantul adalah:

$$x = (2n - 1)\ \frac{\lambda}{4} \qquad \ldots (1.13)$$

Keterangan:

n : 1, 2, 3, . . . atau simpul ke 1, 2, 3, . . .

Untuk gelombang stasioner yang terjadi pada tali dengan ujung tetap maka gelombang pantul akan mengalami pembalikan fase gelombang sebesar $\frac{1}{2}$ periode gelombang atau sebesar p. Dengan demikian, persamaan 1.13 akan menjadi:

$$Y = A \sin(\omega t + kx) + A \sin(\omega t - kx + \pi)$$

$$Y = A \sin\left\{\frac{(\omega t + kx + \pi) + (\omega t - kx)}{2}\right\} \cos\left\{\frac{(\omega t + kx) + (\omega t - kx + \pi)}{2}\right\}$$

$$Y = A \sin(\omega t + \frac{1}{2}\pi) \cos(kx - \frac{1}{2}\pi)$$

$$Y = 2A \sin kx \cos \omega t \qquad \ldots (1.14)$$

Sedangkan amplitudo gelombang stasionernya adalah:

$$A_s = 2A \sin kx \quad \ldots (1.15)$$

Letak perut gelombang dari dinding pemantul dapat ditentukan:

$$x = (2n - 1)\frac{\lambda}{4} \quad \ldots (1.16)$$

Sedangkan letak simpul gelombang dari dinding pemantul dapat ditentukan:

$$x = (n - 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \ldots (1.17)$$

Perhatikan contoh soal berikut, kemudian kerjakan soal pelatihan di bawahnya!

Contoh Soal

Dua buah gelombang transversal masing-masing memiliki persamaan $y_1 = 0{,}2 \sin 4\pi \left(t - \frac{x}{4}\right)$ dan $y_2 = 0{,}2 \sin 4\pi \left(t + \frac{x}{4}\right)$, x dan y dalam meter serta t dalam sekon, merambat berlawanan arah satu sama lain pada seutas tali dengan ujung bebas. Tentukanlah jarak antara perut kedua dan simpul ketiga!

Penyelesaian:

Diketahui: $y_1 = 0{,}2 \sin 4\pi \left(t - \frac{x}{4}\right)$

$y_2 = 0{,}2 \sin 4\pi \left(t + \frac{x}{4}\right)$, ujung bebas

Ditanyakan: jarak perut kedua dan simpul ketiga = . . . ?

Jawab:

Dengan menggunakan persamaan 1.10 kita dapatkan persamaan gelombang stasionernya adalah:

$y = 0{,}4 \cos \pi x \sin 4\pi t$

$k = 2\frac{\pi}{\lambda} = \pi$, sehingga $\lambda = 0{,}5$ m

Kedudukan perut kedua kita tentukan dengan persamaan 1.12.

$x = (2-1)\frac{1}{2} \cdot \lambda = 0{,}25$ m

Kedudukan simpul ketiga kita tentukan dengan persamaan 1.13.

$x = (2 \cdot 3 - 1)\frac{\lambda}{4} = \frac{5}{4} \cdot 0{,}5 \text{ m} = 1{,}25$ m

Jadi, jarak antara perut kedua dan simpul ketiga adalah 1 meter.

Kerja Mandiri 1

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

Buktikan persamaan 1.10 dengan menggunakan persamaan

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

Untuk memperdalam pemahamanmu tentang konsep gelombang stasioner, cobalah lakukan kegiatan berikut ini!

Praktikum 1

Gelombang Stasioner pada Tali

A. Tujuan

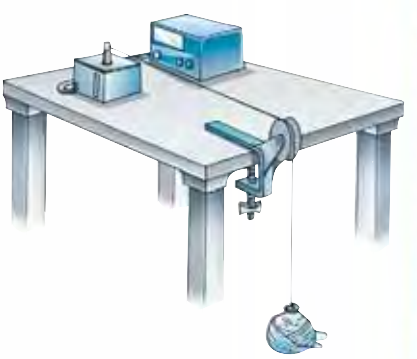
Mencari hubungan antara frekuensi (f) dengan panjang gelombang (λ).

B. Alat dan Bahan

1.	Catu daya	1 buah
2.	Tali atau benang	secukupnya
3.	Katrol penjepit	1 buah
4.	Beban bercelah	1 buah
5.	Klem G	1 buah
6.	*Audio generator*	1 buah
7.	Vibrator	1 buah
8.	Mistar meter	1 buah
9.	Kabel penghubung merah	secukupnya
10.	Kabel penghubung hitam	secukupnya

C. Langkah Kerja

1. Susunlah alat seperti pada gambar di samping!
2. Perhatikan bahwa:
   a. tali tidak putus dari gulungan agar panjang tali dapat diubah dengan mudah;
   b. pembangkit getaran ditempatkan di atas meja sedemikian rupa sehingga mudah digeser-geser menjauh atau mendekati katrol;
   c. beban mula-mula yang dipasang 50 gram dan panjang tali $\pm$ 2 meter.



3. Hubungkan *audio generator* ke sumber tegangan, pastikan bahwa *audio generator* masih dalam keadaan mati (*off*)!
4. Pilih tegangan *output generator* pada 10 × 10 mV rms!
5. Pilih bentuk gelombang sinusoidal!
6. Hubungkan vibrator dengan *audio generator*!
7. Periksa kembali rangkaian!
8. Isikan hasil pengamatanmu pada tabel seperti berikut ini!

No	Frekuensi (Hz)	Jarak 2 simpul terdekat $\left(\frac{1}{2}\lambda\right)$ (m)	Panjang gelombang (λ) (m)
1			
2			
3			
4			
5			

9. Berikanlah kesimpulan dan komentar berdasarkan hasil pengamatanmu!
10. Setelah kamu selesai melaksanakan praktikum, jangan lupa untuk mengembalikan alat dan bahan ke tempat semula! Jagalah kebersihan lingkungan dan tubuhmu!

E. Interferensi Gelombang

Interferensi Gelombang

Salah satu sifat gelombang adalah adanya gejala interferensi gelombang. Bagaimana gejala interferensi gelombang dapat terjadi?

Interferensi gelombang terjadi jika dua buah gelombang atau lebih yang koheren bertemu pada suatu titik. Interferensi ini akan saling memperkuat (interferensi konstruktif) jika fase gelombang pada titik tersebut sama dan akan saling memperlemah (interferensi destruktif) jika fasenya berlawanan. Gelombang resultan merupakan penjumlahan dari gelombang-gelombang tersebut.

Kamu dapat mengamati peristiwa interferensi gelombang melalui percobaan sederhana berikut!

Praktikum 2

Interferensi Gelombang

A. Tujuan

Mengamati pola interferensi.

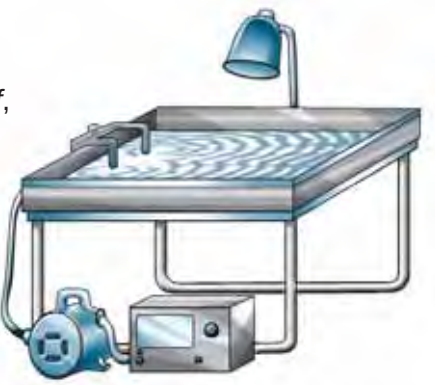
B. Alat dan Bahan

1. Set tangki riak (FGE 12.04) — 1 buah
2. Vibrator udara — 1 buah

3. Selang penghubung secukupnya
4. Kabel penghubung merah secukupnya
5. Kabel penghubung hitam secukupnya
6. *Audio generator* 1 buah
7. Catu daya 1 buah

C. Langkah Kerja

1. Rangkailah alat seperti gambar di samping!
2. Tunggulah hingga air tenang!
3. Pastikan *audio generator* dalam keadaan *off*, dengan frekuensi diatur pada 5–10 Hz!
4. Hidupkan *audio generator* (*on*)!
5. Amatilah bagaimana permukaan air pada tangki riak!
6. Tentukanlah tempat-tempat yang mengalami terang dan gelap!
7. Diskusikan hasilnya dengan kelompokmu!
8. Buatlah kesimpulan berdasarkan pengamatanmu!
9. Peringatan:
   a. Setelah selesai, kembalikan alat ketempat semula!
   b. Jagalah kebersihan lingkungan dan tubuhmu!



F. Layangan Gelombang

Pernahkah kamu mendengarkan bunyi dari dua sumber bunyi (misalnya dari dua sirine) dengan frekuensi hampir sama? Bagaimana kamu mendengar bunyi tersebut?

Ketika kita mendengar dua buah sirine dengan frekuensi yang hampir sama pada saat yang bersamaan, kita akan mendengarkan bunyi kuat-lemah yang beralun. Kuat-lemahnya bunyi ini menunjukkan adanya perubahan amplitudo gelombang. Gejala ini disebut dengan layangan gelombang.

Layangan Gelombang

Layangan gelombang akan terjadi jika dua buah gelombang memiliki perbedaan frekuensi yang sangat kecil. Layangan gelombang dapat dijelaskan berdasarkan konsep gelombang berikut.

Anggaplah kedua sirine memiliki frekuensi masing-masing f_1 dan f_2. Untuk mempermudah, kita asumsikan amplitudo keduanya sama. Persamaan kedua gelombang yang sampai ke telinga kita masing-masing adalah:

$$Y_1 = a \sin \omega_1 \quad \ldots (1.18)$$

$$Y_2 = a \sin \omega_2 \quad \ldots (1.19)$$

Dengan $\omega_1 = 2\pi f_1$ dan $\omega_2 = 2\pi f_2$ maka dengan azas superposisi kedua gelombang akan menghasilkan resultan gelombang dengan persamaan:

$$Y = Y_1 + Y_2$$

$$Y = 2a \cos\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right) \sin\left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right) \quad \ldots (1.20)$$

Persamaan 1.20 identik dengan persamaan 1.10, dengan harga amplitudo gelombang resultannya adalah:

$$A = 2a \cos\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right) \quad \ldots (1.21)$$

A adalah amplitudo yang besarnya selalu berubah. Perubahannya memiliki frekuensi sebesar $\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right)$ atau setengah kali selisih frekuensi keduanya. Secara matematis dapat dirumuskan:

$$f = \left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right)$$

Frekuensi perubahan amplitudo ini hanya akan jelas teramati jika $f_1 - f_2$ tidak besar, misalnya di bawah 10 Hz. Dari persamaan 1.21 dapat dilihat bahwa selisih f_1 dan f_2 tidak begitu besar sehingga $\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right) \approx f_1 \approx f_2$.

Bentuk gelombang resultan pada peristiwa ini dapat ditunjukkan seperti pada gambar 1.11 di samping!

Gambar 1.11 Grafik layangan gelombang

Untuk mengamati terjadinya layangan gelombang, cobalah kamu lakukan percobaan sederhana berikut! Selanjutnya, kerjakan soal di bawahnya!

Praktikum 3

Layangan Gelombang

A. Tujuan

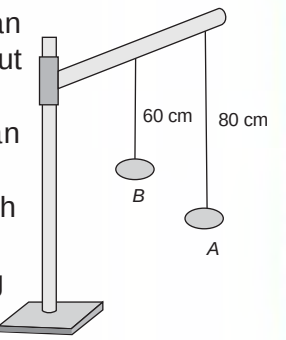
1. Mengamati terjadinya layangan gelombang.
2. Menentukan frekuensi layangan gelombang.

B. Alat dan Bahan

1.	Statif	1 buah
2.	Gergaji tipis kecil atau pelat tipis yang lentur	1 buah
3.	Benang	secukupnya
4.	Beban gantung 50 gram	1 buah
5.	Mistar	1 buah
6.	*Stopwatch*	1 buah
7.	Klem serba guna	1 buah

C. Langkah Kerja

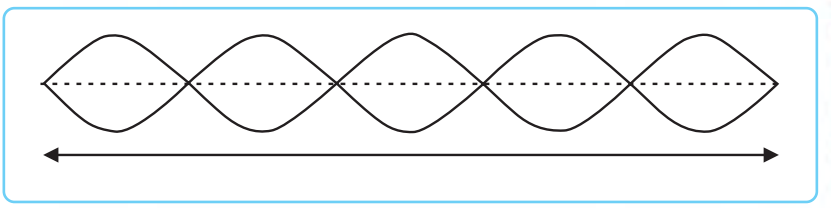
1. Susunlah alat seperti gambar berikut!
2. Berilah simpangan pada beban *A*, kemudian lepaskan sehingga berayun! Pada saat itu upayakan agar *B* tidak turut berayun dengan menahannya.
3. Catatlah frekuensi ayunan *A* dengan menggunakan *stopwatch*!
4. Dengan cara yang sama lakukanlah pada beban *B*, catatlah frekuensi ayunan *B*!
5. Ayunkanlah *A* dan *B* secara bersamaan, amatilah apa yang terjadi dengan ujung gergaji besi!
6. Ukurlah selang waktu pengulangan saat ujung gergaji besi menyimpang paling jauh!
7. Diskusikanlah hasil pengamatanmu dengan kelompokmu!
8. Buatlah komentar dan kesimpulan dari hasil pengamatan tersebut!
9. **Ingat**, setelah kamu selesai melakukan praktik, kembalikan peralatan (alat atau bahan) ke tempat semula! Jagalah kebersihan lingkungan dan tubuhmu!



Kerja Mandiri 2

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

1. Suatu gelombang berjalan memiliki persamaan:
   $y = 20 \sin 100\pi (t - 0{,}5x)$, x dan y dalam cm, dan t dalam sekon.
   Tentukanlah:
   a. frekuensi gelombang,
   b. cepat rambat gelombang, dan
   c. panjang gelombang.
2. Dari hasil percobaan gelombang stasioner didapatkan pola gelombang sebagai berikut.



Jika frekuensi vibrator yang digunakan adalah 50 Hz dan massa tali 3 gram, tentukanlah:

a. cepat rambat gelombang stasioner,

b. tegangan pada tali.

Rangkuman

1. Gelombang adalah rambatan energi getaran.
2. Berdasarkan arah rambat dan arah getarnya gelombang dibedakan atas gelombang transversal dan gelombang longitudinal.
3. Persamaan gelombang berjalan:

   $y = \pm A \sin (\omega t \pm kx)$

4. Cepat rambat gelombang transversal pada tali:

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

5. Persamaan gelombang stasioner:

   $y_s = 2A \cos kx \sin \omega t$

   dengan amplitudo gelombang:

   $A_s = 2A \cos kx$

6. Frekuensi layangan gelombang:

   $f = \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right)$

Soal-soal Uji Kompetensi

A. Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

1. Salah satu ujung seutas tali yang cukup panjang digetarkan sehingga timbul gelombang transversal. Jarak antara dua bukit yang berdekatan adalah 40 cm. Jika frekuensi sumber getar 10 Hz, cepat rambat gelombang pada tali tersebut adalah . . . .

   a. 4 m/s
   b. 2 m/s
   c. 1 m/s
   d. 0,4 m/s
   e. 0,2 m/s

2. Seorang siswa mengamati gelombang pada permukaan air dengan meletakkan dua buah gabus yang terapung tepat di puncak gelombang. Jarak

antara kedua gabus adalah 1 meter. Jika di antara kedua gabus tersebut terdapat 2 puncak gelombang maka panjang gelombang permukaan air tersebut adalah . . . .

a. 50 cm
b. 40 cm
c. 25 cm
d. 20 cm
e. 10 cm

3. Gelombang transversal pada suatu medium memiliki persamaan $y = 0{,}2 \sin (50\pi t - \pi x)$. Jika x dan y dalam meter, t dalam sekon maka frekuensi dan panjang gelombang pada medium tersebut masing-masing adalah . . . .

a. 50 Hz dan 1 meter
b. 50 Hz dan 0,5 meter
c. 25 Hz dan 2 meter
d. 25 Hz dan 1 meter
e. 25 Hz dan 0,5 meter

4. Suatu gelombang berjalan merambat pada tali yang sangat panjang dengan frekuensi 10 Hz dan cepat rambat gelombang 5 m/s. Jika amplitudo gelombang 10 cm maka persamaan simpangan gelombang tersebut pada suatu titik yang berjarak x dari sumber gelombang adalah . . . .

a. $y = 0{,}1 \sin 20\pi (t - 5x)$
b. $y = 0{,}1 \sin 20\pi (t - 0{,}5x)$
c. $y = 0{,}1 \sin 20\pi (t - 0{,}2x)$
d. $y = 0{,}1 \sin 10\pi (t - 5x)$
e. $y = 0{,}1 \sin 10\pi (t - 0{,}2x)$

5. Suatu gelombang stasioner memiliki persamaan $y = 40 \cos 2\pi x \sin 100\pi t$. x dan y dalam cm dan t dalam sekon.

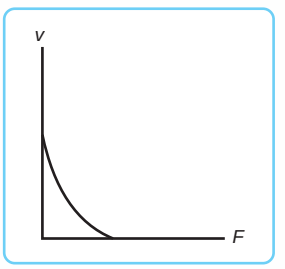
Pernyataan berikut berkaitan dengan gelombang stasioner tersebut.

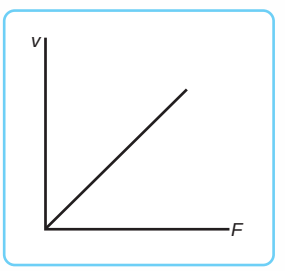
1) Amplitudo gelombang sumber adalah 40 cm.
2) Frekuensi gelombang sumber 50 Hz.
3) Panjang gelombang sumber adalah 50 cm.
4) Cepat rambat gelombang sumber adalah 250 cm/s.

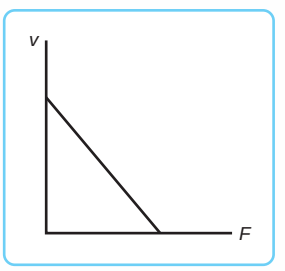
Pernyataan di atas yang benar adalah . . . .

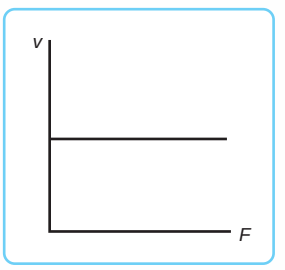
a. 1), 2), dan 3)
b. 1) dan 3)
c. 2) dan 4)
d. 4) saja
e. 1), 2), 3), dan 4)

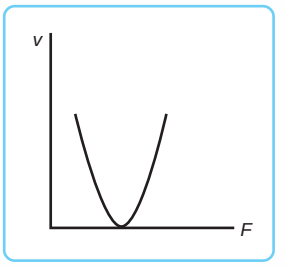
6. Grafik berikut yang menunjukkan hubungan antara gaya tegangan tali dengan cepat rambat gelombang pada tali adalah . . . .

a.


b.


c.


d.


e.


7. Suatu gelombang stasioner memiliki panjang gelombang 60 cm. Jarak simpul dan perut gelombang terdekat adalah . . . .
   a. 15 cm
   b. 30 cm
   c. 45 cm
   d. 60 cm
   e. 75 cm

8. Seorang siswa melakukan percobaan gelombang stasioner pada tali yang panjangnya 150 cm dengan beban 1,5 newton. Dari hasil percobaan didapatkan pola gelombang yang terdiri atas 3 perut dan 4 simpul. Jika frekuensi vibrator yang digunakan 50 Hz maka cepat rambat gelombang stasioner tersebut adalah . . . .
   a. 1,5 m/s
   b. 1,0 m/s
   c. 0,75 m/s
   d. 0,5 m/s
   e. 0,25 m/s

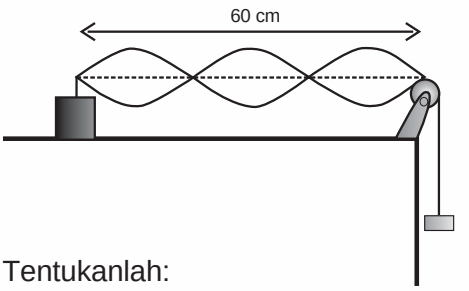
9. Syarat terjadinya interferensi gelombang adalah gelombang-gelombang yang mengalami interferensi harus bersifat koheren, maksudnya adalah . . . .
   1) memiliki panjang gelombang yang sama
   2) memililki amplitudo yang sama
   3) memiliki frekuensi yang sama
   4) memiliki fase yang sama

   Pernyataan di atas yang benar adalah . . . .
   a. 1), 2), dan 3)
   b. 1) dan 3)
   c. 2) dan 4)
   d. 4) saja
   e. 1), 2), 3), dan 4)

10. Dua buah sumber gelombang masing-masing memancarkan frekuensi 100 Hz dan 110 Hz. Periode layangan yang teramati adalah . . . .
   a. 10 sekon
   b. 5 sekon
   c. 2,5 sekon
   d. 0,2 sekon
   e. 0,1 sekon

B. Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!

1. Pada ujung seutas tali yang cukup panjang digetarkan dengan frekuensi 10 Hz dan amplitudo 25 cm. Jika cepat rambat gelombang pada tali tersebut 2 m/s, tentukanlah simpangan gelombang pada suatu titik yang berjarak 2 meter dari sumber gelombang pada saat t = 0,5 sekon!
2. Gelombang pada permukaan air memiliki persamaan $y = 0{,}1 \sin (200\pi t - 10\pi x)$, x dan y dalam meter, t dalam sekon. Setelah mengalami pemantulan, pertemuan gelombang datang dan gelombang pantul menyebabkan terbentuknya gelombang stasioner. Jika dianggap gelombang pada air mengalami pemantulan pada ujung bebas,
   a. tuliskanlah persamaan gelombang stasionernya,
   b. tentukanlah jarak antara dua simpul gelombang yang berdekatan.
3. Seorang siswa melakukan percobaan gelombang stasioner dengan menggunakan vibrator berfrekuensi 50 Hz. Percobaan itu menghasilkan pola gelombang sebagai berikut.



   Tentukanlah:
   a. cepat rambat gelombang stasioner pada percobaan tersebut,
   b. jika massa beban 100 gram dan percepatan gravitasi 10 m/s^2, tentukanlah μ tali yang digunakan.
4. Seutas kawat yang mempunyai massa jenis 0,2 kg/m ditegangkan dengan gaya 20 N. Salah satu ujung kawat tersebut digetarkan dengan frekuensi 8 Hz dan amplitudo 0,02 m. Jika getaran menjalar ke kanan, tentukan persamaan gelombang tersebut!
5. Seutas tali yang panjangnya 58 cm salah satu ujungnya terikat dan ujung lainnya digetarkan vertikal. Frekuensi dan amplitudo getar tali tersebut masing-masing 8 Hz dan 5 cm. Jika kecepatan gelombang yang menjalar pada tali adalah 4 cm/sekon. Tentukan amplitudo gelombang hasil perpaduan di titik yang berjarak 4 cm dari ujung yang digetarkan!

BAB 2

BUNYI

Pada bab ini kita akan belajar tentang bunyi.
Selanjutnya kita akan mempelajari interferensi, resonansi, efek doppler, dan intensitas bunyi.
Ya. Kita awali dengan mempelajari gelombang bunyi melalui percobaan gelombang bunyi.
Jangan lupa! Kita juga mempelajari contoh-contoh penerapan-nya dalam teknologi.
Setalah mempelajari bab ini kita akan memahami tentang bunyi dan sifat-sifatnya, serta penerapannya dalam kehidupan sehari-hari.

Gerbang

Gambar 2.1 Musik merupakan bagian bunyi

Betapa indahnya suara terompet itu. Alunan nada-nada merasuk sukma melalui telinga. Lagu yang indah menambah berseri suasana hati. Bagaimana suara musik dapat sampai di telinga kita? Bagaimana pula jika suara itu terlalu keras? Suara musik merupakan bagian dari bunyi.

Apakah sebenarnya bunyi itu? Untuk mengenal lebih jauh tentang bunyi marilah kita pelajari pembahasan berikut ini!

Kata Kunci: Gelombang Bunyi – Interferensi – Resonansi – Efek Doppler – Intensitas Bunyi

A. Gelombang Bunyi

Ketika kita mendengarkan alunan musik, kita jarang berpikir dari mana alunan itu. Biasanya kita hanya berdecak kagum. ”Aduh, indah sekali musik itu.” Sebagai kaum intelektual, pertanyaan yang layak diajukan adalah dari manakah bunyi yang indah itu berasal? Bagaimana bunyi itu bisa terjadi?

Gelombang bunyi dihasilkan oleh benda bergetar sehingga menyebabkan gangguan kerapatan pada medium. Gangguan ini berlangsung melalui interaksi molekul-molekul medium sepanjang arah perambatan gelombang. Adapun molekul hanya bergetar ke depan dan ke belakang di sekitar posisi kesetimbangan. Gelombang bunyi merupakan gelombang longitudinal yang terjadi karena adanya rapatan dan renggangan medium baik gas, cair, maupun padat.

Gelombang Bunyi

Apakah setiap getaran dapat menghasilkan bunyi? Cobalah menjatuhkan sekeping uang logam ke lantai. Dapatkah kamu mendengar suara dari uang logam tersebut? Selanjutnya jatuhkan benda yang ringan, misalnya sesobek kertas di atas lantai. Masih dapatkah kamu mendengar suara jatuhnya kertas tersebut?

Kedua percobaan di atas menunjukkan kepada kita bahwa tidak semua getaran menghasilkan bunyi. Lalu, berapa batas frekuensi getaran yang masih dapat kita dengar? Adakah hal lain yang memengaruhi sehingga bunyi dapat kita dengar? Untuk memahami hal ini lakukanlah percobaan berikut!

Praktikum 1

Gelombang Bunyi

A. Tujuan

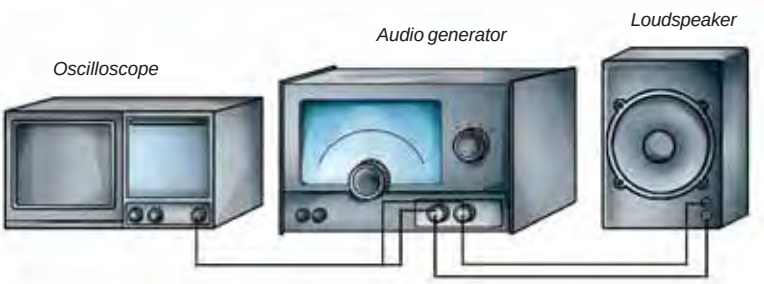
Mengamati gelombang bunyi.

B. Alat dan Bahan

1. *Audio generator* 1 buah
2. *Oscilloscope* (CRO) 1 buah
3. *Loudspeaker* 8 ohm 1 buah
4. Kabel penghubung 2 buah

C. Langkah Kerja

1. Susunlah alat-alat di atas sebagai berikut!



Perhatikan bahwa:

a. CRO dan *audio generator* dalam keadaan *off*.

b. Pada CRO:
   1) *input* horizontal
   2) volt/div pada 0,5 volt/cm
   3) *sweep time* pada 0,1 ms

c. Pada *audio generator*:
   1) jenis gelombang sinus
   2) v_{pp} pada 10 mV

2. Hubungkan CRO dan *audio generator* pada sumber tegangan PLN!
3. Hidupkan *audio generator* dan CRO (posisi *on*)!

4. Aturlah frekuensi *audio generator* mulai dari frekuensi rendah ke frekuensi yang lebih tinggi, putar perlahan-lahan!
5. Amati perubahan tampilan grafik pada CRO!
6. Rasakan perubahan bunyi yang terjadi!
7. Dengan frekuensi tetap, aturlah posisi v_{pp} *audio generator* dari harga kecil ke besar!
8. Amati perubahan yang terjadi!
9. Buatlah komentar dan kesimpulan dari hasil pengamatanmu!
10. Diskusikan hasil pengamatanmu pada diskusi kelas!

Peringatan:

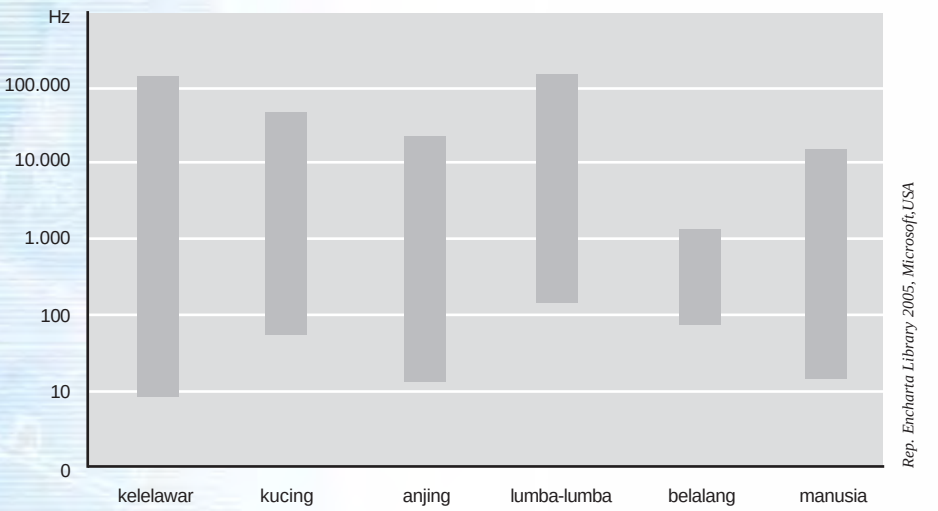
a. Kembalikanlah semua alat praktikum pada tempat semula!

b. Jagalah kebersihan laboratorium selama dan setelah praktikum!

Tidak setiap getaran menghasilkan bunyi yang dapat kita dengar. Bunyi yang dapat kita dengar berkisar pada frekuensi 20 Hz sampai dengan 20 KHz. Daerah frekuensi ini disebut daerah audio. Frekuensi bunyi di bawah 20 Hz disebut daerah infrasonik, sedangkan frekuensi bunyi di atas 20 KHz disebut daerah ultrasonik.

Berikut ini adalah perbandingan wilayah frekuensi yang dapat didengar oleh berbagai binatang dan manusia.

Grafik 2.1 Perbandingan Rentang Frekuensi Pendengaran pada Binatang dan Manusia



1. Cepat Rambat Bunyi

Ketika terjadi petir, pernahkah kamu mengamati bahwa ada selang waktu antara kilatan petir dengan bunyi guntur yang kita dengar? Mengapa demikian? Hal ini dikarenakan bunyi memerlukan waktu untuk merambat sampai ke telinga kita. Sementara cepat rambat cahaya jauh lebih besar daripada cepat rambat bunyi di udara. Dengan demikian, waktu yang diperlukan oleh cahaya dan bunyi guntur ke telinga kita akan memiliki perbedaan yang cukup besar.

Bunyi dapat merambat melalui berbagai medium, baik padat, gas, maupun cair. Seperti bunyi guntur yang dapat merambat melalui medium gas. Laju gelombang bunyi pada suatu medium bergantung dari sifat medium tersebut. Laju gelombang bunyi dalam fluida dirumuskan sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad \ldots (2.1)$$

Keterangan:

v : laju gelombang bunyi (m/s)
B : modulus Bulk (Pa)
ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)

Selain gelombang bunyi dapat merambat melalui fluida, gelombang bunyi juga dapat merambat melalui zat padat. Pada medium zat padat, misalnya besi, laju bunyi dirumuskan sebagai berikut.

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad \ldots (2.2)$$

Keterangan:

v : laju gelombang bunyi (m/s)
Y : modulus Young (N/m^2)
ρ : massa jenis zat padat (kg/m^3)

Adapun pada medium gas misalnya udara, laju bunyi dirumuskan:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad \ldots (2.3)$$

Keterangan:

v : laju gelombang bunyi (m/s)
γ : konstanta laplace
R : tetapan gas ideal (8,314 J/mol.K)
T : suhu mutlak gas (K)
M : massa molar gas (untuk udara bernilai 29 · 10^{-3} kg/mol)

Tabel 2.1 Laju Bunyi pada Berbagai Medium

No.	Medium	Temperatur (°C)	Laju (m/s)
1.	Udara	0	331,3
2.	Hidrogen	0	1.286
3.	Oksigen	0	3.17,2
4.	Air	15	1.450
5.	Timah	20	1.230
6.	Alumunium	20	5.100
7.	Tembaga	20	3.560
8.	Besi	20	5.130

Contoh Soal

Tentukanlah laju bunyi di udara pada suhu 0° C, jika konstanta Laplace = 1,4!

Penyelesaian:

Diketahui: $\gamma = 1{,}4$

$T = 0°C = 273$ K

Ditanyakan: $v = \ldots ?$

Jawab:

Dengan menggunakan persamaan 2.2 dapat dihitung:

$$v = \sqrt{\frac{1{,}4 \cdot 8{,}314 \cdot 273}{29 \cdot 10^{-3}}} = 331 \text{ m/s}$$

2. Pemantulan Bunyi

Saat gelombang bunyi bergerak menembus udara, gelombang bunyi itu mendorong molekul udara di depannya. Partikel-partikel udara ini kemudian menabrak lebih banyak partikel lainnya dan juga mendorongnya dalam serangkaian gelombang. Ketika gelombang ini mencapai telingamu, kamu mendengarnya sebagai bunyi.

Rambatan gelombang bunyi dari sumber bunyi tidak selalu langsung sampai ke telinga. Gelombang bunyi dapat saja terpantulkan untuk sampai ke pendengar.

Jika sebuah gelombang bunyi mengalami pemantulan, maka waktu yang diperlukan untuk sampai pada pendengar semakin lama, karena jarak tempuh yang semakin besar. Jarak antara sumber bunyi dengan tempat pantulan dinyatakan dalam persamaan:

$$d = \frac{v \cdot \Delta t}{2}$$

Keterangan:

d : jarak sumber bunyi dengan tempat pemantul bunyi (m)

v : laju bunyi (m/s)

Δt : selang waktu antara gelombang bunyi dipancarkan hingga diterima kembali (sekon)

Sifat pemantulan gelombang bunyi kemudian dimanfaatkan orang untuk mengukur jarak suatu benda dengan sumber bunyi. Sonar merupakan alat yang sering digunakan pada kapal untuk mendeteksi jarak suatu objek dengan kapal, termasuk juga kedalaman laut.

Sonar singkatan dari *sound navigation and ranging* adalah sistem deteksi dengan menggunakan pantulan gelombang bunyi untuk navigasi bawah air. Sistem ini banyak digunakan pada kapal dan kapal selam untuk mendeteksi kedalaman laut maupun mendeteksi sasaran atau objek di bawah permukaan air laut.

Sebaiknya Tahu

Sumber: Dok. CAP

Gambar 2.2 Kelelawar mengirim semacam sonar untuk menemukan mangsanya

Kelelawar menggunakan semacam sonar yang disebut ekolokasi untuk menemukan mangsanya. Kelelawar mengirimkan gelombang bunyi yang sangat tinggi dan mendengarkan gemanya. Kelelawar dapat mengenali ukuran, bentuk dan tekstur dari sebuah objek dari gema. Ekolokasi juga membuat kelelawar menemukan jalan di sekitarnya dalam kegelapan malam.

(Sumber: *Seri kegiatan sains: Bunyi dan Pendengaran (terjemahan):* Pakar Raya. 2006)

Tipe gelombang yang digunakan dalam sonar adalah gelombang ultrasonik. Pulsa gelombang ini dipancarkan oleh sebuah generator pembangkit gelombang ultrasonik dan pantulannya akan dideteksi dengan menggunakan mikrofon yang sangat peka yang disebut *hydrophone.*

Gambar 2.3 Sebuah kapal penyapu ranjau dilengkapi dengan sonar untuk mendeteksi ranjau di bawah permukaan air laut

Sebagaimana radar, alat ini juga dilengkapi layar untuk menampilkan posisi objek di bawah permukaan air laut.

Agar kamu lebih memahami pemantulan bunyi, cermatilah contoh soal di bawah ini, kemudian kerjakan pelatihan di bawahnya!

Contoh Soal

Sebuah gelombang sonar dipancarkan oleh sebuah kapal penyapu ranjau. Jika dalam 2 sekon, gelombang sonar pantul diterima oleh *hydrophone*, akibat terpantul oleh sebuah objek yang diduga berupa ranjau laut. Tentukan jarak objek (ranjau) dengan kapal jika cepat rambat gelombang sonar 360 m/s!

Penyelesaian:

Diketahui: $\Delta t = 2$ s

$v = 360$ m/s

Ditanyakan: $d = \ldots ?$

Jawab:

$$d = \frac{v \cdot \Delta t}{2}$$

$$d = \frac{360 \cdot 2}{2}$$

$$d = 360 \text{ m}$$

Kerja Mandiri

Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!

1. Sebuah kapal mengeluarkan gelombang sonar yang kemudian terpantul oleh permukaan bawah laut dalam waktu 5 sekon. Jika cepat rambat gelombang sonar dalam air laut 380 m/s, tentukan kedalaman laut di tempat tersebut!
2. Saat seorang anak berdiri di mulut gua, ia berteriak. Jika bunyi pantul terdengar setelah 2,5 sekon dan kecepatan bunyi di tempat itu 344 m/s, tentukan kedalaman gua tersebut!

3. Interferensi Bunyi

Untuk memahami interferensi, cobalah kamu lempar dua buah kerikil yang ukurannya hampir sama pada sebuah kolam air yang tenang! Jika kedua kerikil jatuh pada tempat berdekatan, riak gelombang yang dihasilkan akan saling bertemu. Pertemuan kedua riak gelombang tersebut menggambarkan adanya pola interferensi gelombang. Hal yang sama juga terjadi jika dua gelombang bunyi yang berdekatan bertemu.

Interferensi bunyi terjadi jika dua buah sumber bunyi yang koheren sampai ke telinga kita. Pada suatu titik bunyi akan terdengar lebih kuat jika pada titik tersebut terjadi interferensi konstruktif (saling memperkuat), sebaliknya akan terdengar lemah jika terjadi interferensi destruktif (saling memperlemah).

Untuk memahami kejadian ini, cobalah lakukan percobaan sederhana berikut ini!

Praktikum 2

Interferensi Bunyi

A. Tujuan

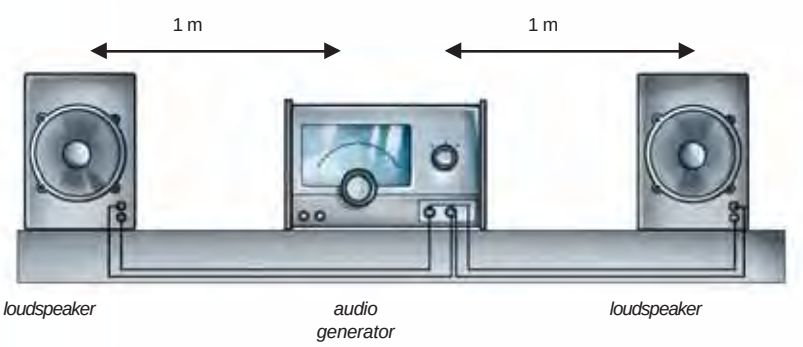
Mengamati gejala interferensi bunyi.

B. Alat dan Bahan

1.	*Audio generator*	1 buah
2.	*Loudspeaker* 8 ohm	2 buah
3.	Kabel penghubung merah sepanjang 1 meter	2 buah
4.	Kabel penghubung hitam sepanjang 1 meter	2 buah
5.	Mistar 1 meter	1 buah

C. Langkah Kerja

1. Susunlah alat dan bahan seperti gambar berikut!



a. Pastikan audio generator pada posisi *off*!
b. Pilih skala frekuensi pada 100 Hz dengan gelombang keluaran sinus!
c. Hubungkan *audio generator* dengan sumber tegangan PLN!

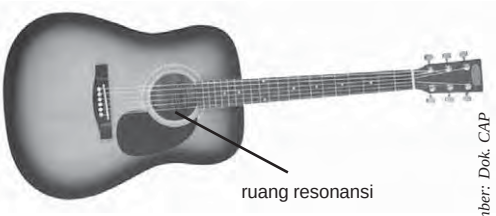
2. Hidupkanlah *audio generator* (posisi *on*)!
3. Berjalanlah secara perlahan sepanjang garis di antara kedua *loudspeaker*!
4. Dengarkanlah secara saksama bunyi yang dihasilkan oleh kedua *loudspeaker*!
5. Tentukanlah titik-titik di mana kamu mendengar bunyi menjadi lebih keras dan bunyi menjadi lebih lemah!
6. Buatlah kesimpulan dari hasil pengamatanmu!
7. Presentasikan hasil kerjamu di depan kelas!

Peringatan:

a. Lakukan percobaan dengan hati-hati dan cermat, terutama terhadap alat percobaan yang menggunakan listrik!
b. Jagalah kebersihan lingkunganmu! Setelah selesai melaksanakan percobaan, kembalikan alat-alat percobaan pada tempat semula!

3. Resonansi Bunyi

Pernahkah kamu memainkan gitar akustik? Gitar akustik merupakan alat musik yang terdiri atas senar yang terentang dengan ketegangan tertentu, dan sebuah kolom resonansi. Senar gitar yang dipetik dapat menghasilkan gelombang berdiri yang memiliki frekuensi alami atau frekuensi resonansi senar.



Sumber: Dok. CAP

Gambar 2.4 Ruang resonansi pada gitar

Pada saat senar gitar dipetik, udara yang ada dalam ruangan pada bagian gitar tersebut turut bergetar dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi getaran dawai. Peristiwa ini disebut dengan resonansi. Resonansi menghasilkan pola gelombang stasioner yang terdiri atas perut dan simpul gelombang dengan panjang gelombang tertentu.

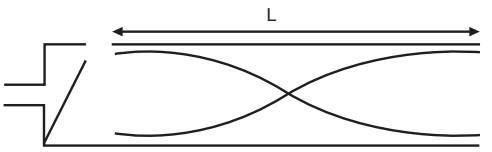
Resonansi

Pada saat gelombang berdiri terjadi pada senar maka senar akan bergetar pada tempatnya. Pada saat frekuensinya sama dengan frekuensi resonansi, hanya diperlukan sedikit usaha untuk menghasilkan amplitudo besar. Hal inilah yang terjadi saat senar dipetik.

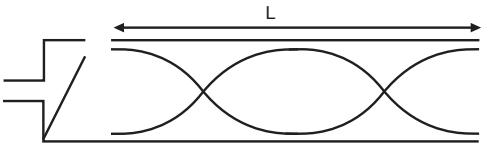
Contoh lain peristiwa resonansi adalah pada pipa organa. Ada dua jenis pipa organa, yaitu pipa organa terbuka dan pipa organa tertutup.

a. Pipa Organa Terbuka

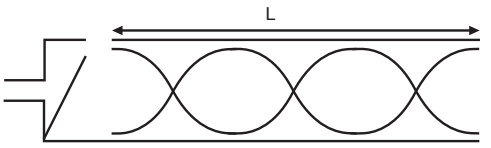
Pada pipa organa terbuka bagian ujungnya terbuka. Nada dasar pipa organa terbuka (f_0) bersesuaian dengan pola sebuah perut pada bagian ujung dan sebuah simpul pada bagian tengahnya. Perhatikan gambar 2.5.a – 2.5.c berikut ini!



Gambar 2.5.a Gelombang nada dasar pipa organa terbuka



Gambar 2.5.b Gelombang nada atas pertama pipa organa terbuka



Gambar 2.5.c Gelombang nada atas kedua pipa organa tertutup

Frekuensi nada dasar dapat dihitung sebagai berikut.

$$L = \frac{1}{2}\lambda_0 \text{ atau } \lambda_0 = 2L$$

Sehingga,

$$f_0 = \frac{v}{2L} \qquad \ldots (2.4.)$$

Dengan cara yang sama nada atas pertama (f_1) dapat ditentukan sebagai berikut.

$$f_1 = \frac{v}{L} \qquad \ldots (2.5)$$

Nada atas kedua (f_2) adalah:

$$f_2 = \frac{3v}{2L} \qquad \ldots (2.6)$$

Dari keadaan di atas dapat kita ketahui bahwa:

$$f_0 : f_1 : f_2 = 1 : 2 : 3 \qquad \ldots (2.7)$$

Sebaiknya Tahu

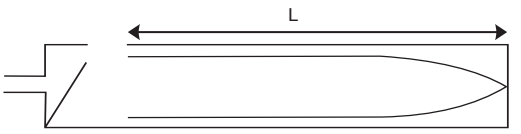
Organ Pipa

Gambar 2.6 Organ pipa

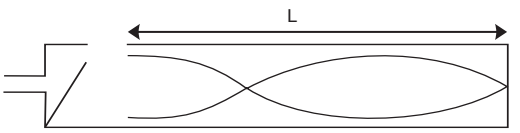
Organ pipa menghasilkan musik yang lembut. Musik yang dihasilkan merupakan hasil resonansi udara pada pipa. Dengan mengatur panjang pipa resonansi maka masing-masing pipa akan menghasilkan nada yang berbeda. Pemain organ menekan tuts organ untuk mengatur pada pipa mana udara beresonansi sesuai nada yang diinginkan.

b. Pipa Organa Tertutup

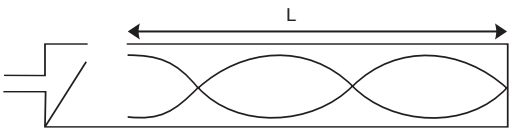
Pada pipa organa tertutup pola resonansinya dapat kita lihat pada gambar 2.7.a – 2.7.c berikut.



Gambar 2.7.a Gelombang nada dasar pipa tertutup



Gambar 2.7.b Gelombang nada atas pertama pipa organa tertutup



Gambar 2.7.c Gelombang nada atas kedua pipa organa tertutup

Frekuensi nada dasar dapat dihitung sebagai berikut.

$$L = \frac{1}{4}\ \lambda \text{ atau } \lambda = 4L$$

Sehingga,

$$f_0 = \frac{v}{4L} \qquad (2.8)$$

Dengan cara yang sama, nada atas pertama (f_1) dapat ditentukan sebagai berikut:

$$f_1 = \frac{3v}{4L} \qquad (2.9)$$

Nada atas kedua (f_2) ditentukan:

$$f_1 = \frac{5v}{4L} \qquad (2.10)$$

Jadi, perbandingan frekuensinya adalah:

$$f_0 : f_1 : f_2 = 1 : 3 : 5 \qquad (2.11)$$

Praktikum 3

Panjang Gelombang Bunyi dalam Pipa Berongga

A. Tujuan

Mengukur panjang gelombang bunyi yang dihasilkan di dalam pipa berongga.

B. Alat dan Bahan

1. Pipa berongga dari plastik — secukupnya
2. Ember berisi $\frac{3}{4}$ air — 1 buah
3. Garpu tala — secukupnya
4. Penggaris dan pulpen — 1 buah

C. Langkah Kerja

1. Masukkan pipa ke dalam air sehingga tegak dan hampir tenggelam seluruhnya!
2. Pukullah salah satu garpu tala pada bagian atas meja, kemudian dekatkan pada ujung pipa dan menyembul dari air!
3. Tariklah pipa keluar dari air dan dengarkan secara saksama! Teruslah mendengarkan hingga bunyi garpu tala berbunyi paling keras!
4. Saat kamu telah menemukan titik bunyi paling keras, tandailah dengan pulpen!
5. Keluarkan pipa dari air! Ukurlah jarak dari tanda yang sudah kamu buat ke puncak pipa yang tidak tenggelam.
6. Ulangi kegiatan di atas, kemudian ukurlah jarak dari pipa yang terbuka ke setiap tanda yang kamu buat saat terdengar bunyi yang keras!
7. Lakukan pula kegiatan di atas dengan garpu tala yang mempunyai frekuensi berbeda-beda! Catatlah hasil tersebut pada tabel berikut!

Frekuensi Garpu Tala (Hz)	Panjang Kolom Berongga		
	Titik Bunyi Keras Pertama	Titik Bunyi Keras Kedua	Titik Bunyi Keras Ketiga

8. Analisislah hasil yang kamu peroleh dan diskusikan dengan kelompokmu!
9. Sampaikan hasil diskusi kelompokmu dalam diskusi kelas!
10. Kumpulkan laporan kegiatanmu dan hasil diskusimu pada guru untuk dinilai!

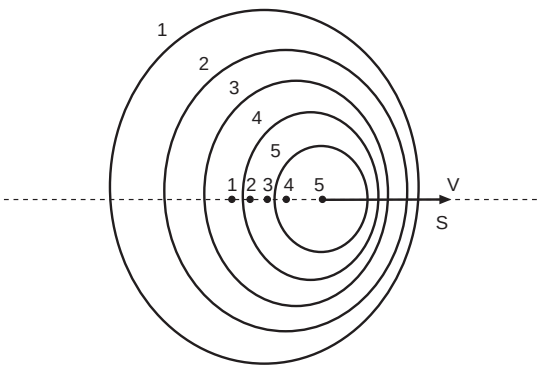
Peringatan:

a. Setelah selesai, kembalikan alat percobaan ke tempat semula!
b. Jagalah kebersihan alat dan lingkungan percobaan!

B. Efek Doppler

Jika kita berdiri di pinggir jalan kemudian melintas sebuah ambulans dengan sirine yang berbunyi, kita akan mendengar frekuensi sirine yang relatif lebih tinggi dari frekuensi sirine yang sebenarnya. Sebaliknya frekuensi sirine akan terdengar lebih rendah ketika ambulans bergerak menjauhi kita. Peristiwa naik-turunnya frekuensi bunyi semacam ini disebut efek Doppler.

Efek Doppler



Gambar 2.8 Pola muka gelombang pada efek Doppler

Perubahan frekuensi gelombang bunyi bergantung kepada sumber bunyi atau pengamat yang bergerak relatif terhadap medium. Untuk memahami peristiwa ini perhatikan gambar 2.6 di samping!

Pada ilustrasi tersebut, sumber bunyi bergerak dengan kecepatan v_s. Muka gelombang pada bagian depan mengalami kompresi sehingga lebih rapat daripada muka gelombang pada saat sumber gelombang diam. Sebaliknya, muka gelombang bagian belakang terlihat lebih renggang.

Anggaplah panjang gelombang di depan sumber sebagai λ_m dan panjang gelombang di belakang sumber sebagai λ_b. Misalkan frekuensi sumber adalah f_0. Setelah selang waktu Δt, sumber telah menghasilkan gelombang sebanyak $N = f_0 \cdot \Delta t$ dan menempuh jarak sejauh $d_s = v_s \cdot \Delta t$. Sementara muka gelombang pertama menempuh jarak sejauh $d_\lambda = v \cdot \Delta t$, ($v$ = laju gelombang bunyi).

Panjang gelombang di depan sumber dapat dihitung dengan rumus:

$$\lambda_m = \frac{(v - v_s) \cdot \Delta t}{N} = \frac{(v - v_s) \cdot \Delta t}{f_0 \cdot \Delta t}$$

$$\lambda_m = \frac{v}{f_0}\left(1 - \frac{v_s}{v}\right) \quad \ldots (2.12)$$

Sedangkan panjang gelombang di belakang sumber adalah

$$\lambda_b = \frac{(v + v_s) \cdot \Delta t}{N} = \frac{(v + v_s) \cdot \Delta t}{f_0 \cdot \Delta t}$$

$$\lambda_b = \frac{v}{f_0}\left(1 + \frac{v_s}{v}\right) \quad \ldots (2.13)$$

Laju gelombang v hanya bergantung pada sifat-sifat medium dan tidak bergantung pada laju sumber. Pada sumber yang bergerak mendekati pengamat, frekuensi f' yang melewati suatu titik yang diam terhadap medium adalah:

$$f' = \frac{v}{\lambda_m} = \frac{f_0}{1 - \frac{v_s}{v}} \quad \ldots (2.14)$$

Apabila sumber bergerak menjauhi pengamat maka frekuensinya adalah:

$$f' = \frac{v}{\lambda_b} = \frac{f_0}{1 + \frac{v_s}{v}} \quad \ldots (2.15)$$

Jika sumber dalam keadaan diam dan pengamat bergerak relatif terhadap medium maka tidak ada perubahan panjang gelombang yang melewati penerima. Frekuensi yang melewati pengamat akan bertambah jika pengamat bergerak mendekati sumber dan berkurang jika pengamat bergerak menjauhi sumber.

Banyaknya gelombang yang diterima oleh pangamat diam dalam waktu Δt adalah banyaknya gelombang dalam jarak $v \cdot \Delta t$ sebanyak $v \cdot \frac{\Delta t}{\lambda}$. Bila pengamat bergerak dengan laju relatif v_p terhadap medium maka pengamat akan melalui sejumlah gelombang tambahan $v_p \cdot \frac{\Delta t}{\lambda}$. Jumlah total gelombang yang melewati pengamat dalam waktu Δt adalah:

$$N = \frac{v \cdot \Delta t + v_p \cdot \Delta t}{\lambda} = \frac{v + v_p}{\lambda} \Delta t$$

Frekuensi yang diterima pengamat yang bergerak mendekati sumber adalah:

$$f' = \frac{N}{\Delta t} = \frac{v + \lambda}{\lambda}$$

$$f' = f_0\left(1 - \frac{v_p}{v}\right) \quad \ldots (2.16)$$

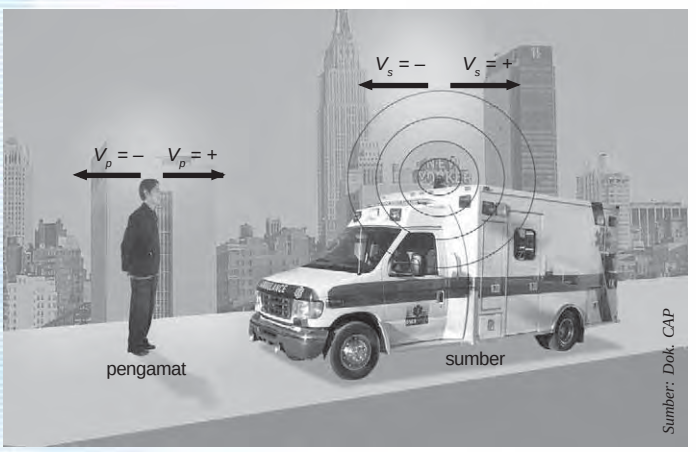
Jika pengamat bergerak menjauhi sumber, frekuensi yang teramati adalah:

$$f' = f_0\left(1 - \frac{v_p}{v}\right) \quad \ldots (2.17)$$

Jika baik pengamat maupun sumber bergerak terhadap medium maka hasil yang dituliskan pada persamaan 2.14 – 2.17 dapat dituliskan sebagai berikut.

$$f' = \frac{(v \pm v_p)}{(v \pm v_s)} f_0 \quad \ldots (2.18)$$

Untuk mempermudah penggunaan tanda + atau - kita dapat menggunakan bantuan gambar di bawah ini.



Gambar 2.9 Ilustrasi penentuan tanda + atau - pada kecepatan dalam efek Doppler

Agar kamu lebih mudah memahami efek Doppler, pelajarilah contoh soal berikut ini!

Contoh Soal

Sebuah mobil membunyikan sirine pada frekuensi 400 Hz. Jika laju mobil 20 m/s, dan laju bunyi di udara 340 m/s, tentukan frekuensi sirine yang didengar oleh pengamat!

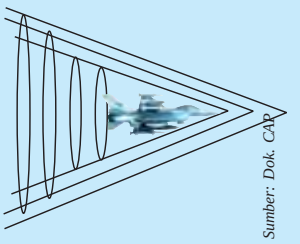
Penyelesaian:

Diketahui: v = 340 m/s
v_p = 0
v_s = 20 m/s
f_o = 400 Hz

Ditanyakan: f' = . . . ?

Sebaiknya Tahu

Bom Sonik



Gambar 2.10 Benturan antar-partikel udara menimbulkan bom sonik

Beberapa saat setelah pesawat jet bergerak dengan kecepatan melebihi kecepatan suara di udara, akan terjadi benturan antar partikel udara. Benturan tersebut menimbulkan ledakan yang terdengar sebagai suara menggelegar. Jika pesawat jet terbang terlalu rendah akan menyebabkan getaran yang dapat mengakibatkan pecahnya kaca pada gedung-gedung.

Jawab:

Dengan menggunakan persamaan 2.18 dapat kita tentukan bahwa:

$$f' = \frac{(340 - 0)}{(340 - 20)} \times 400$$

$$f' = 425 \text{ Hz}$$

Jadi frekuensi yang terdengar oleh pengamat adalah 425 Hz.

C. Intensitas Bunyi

Sejauh ini kita telah meninjau gelombang satu dimensi, yaitu gelombang yang menjalar dalam garis lurus. Gelombang bunyi merupakan gelombang yang merambat secara konsentris dalam ruang tiga dimensi. Kita dapat menganggap sumber bunyi sebagai sebuah titik. Gelombang bunyi dipancarkan ke segala arah dan muka gelombangnya merupakan permukaan bola yang konsentris (gambar 2.11). Intensitas bunyi adalah daya rata-rata per satuan luas yang datang tegak lurus arah rambatan.

Intensitas Bunyi

Jarak antara benda dengan radar dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

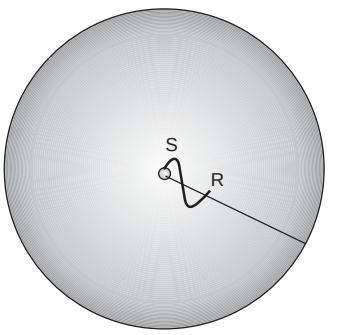
$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad \ldots (2.21)$$

Keterangan:

d : jarak objek ke kapal (m)

c : cepat rambat gelombang (m/s)

Δt : selang waktu antara gelombang pancar dengan gelombang pantul (s)



Gambar 2.11 Sumber gelombang bunyi dianggap sebagai titik dan gelombang bunyi merambat secara konsentris dalam ruang tiga dimensi

Jika sumber bunyi memancarkan gelombang ke segala arah secara homogen, energi pada jarak r dari sumber akan terdistribusi secara seragam pada kulit bola berjari-jari r. Adapun luas permukaan bola adalah $4 \pi r^2$. Intensitas bunyi yang dihasilkan sumber titik dapat ditentukan dengan rumus:

$$I = \frac{P_{rata\text{-}rata}}{4 \pi r^2} \quad \ldots (2.20)$$

Keterangan:

I : intensitas bunyi (watt/m^2)

$P_{rata\text{-}rata}$: daya rata-rata yang dihasilkan rumber bunyi (watt)

r : jarak antara sumber bunyi ke titik yang ditinjau (m)

Intensitas bunyi terlemah yang masih dapat kita dengar disebut ambang pendengaran. Besarnya ambang pendengaran kita adalah 10^{-12} watt/m^2. Sedangkan intensitas tertinggi yang dapat kita dengar tanpa rasa sakit disebut ambang perasaan dan besarnya 10^2 watt/m^2.

Contoh Soal

Tentukan perbandingan intensitas bunyi yang diterima dua pengamat A dan B jika masing-masing berjarak 2 meter dan 4 meter dari sumber bunyi!

Penyelesaian:

Dari persamaan 2.6 dapat kita simpulkan bahwa intensitas bunyi di suatu titik berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya dari sumber bunyi. Dengan demikian maka:

$$I_A : I_B = r_B^2 : r_A^2$$
$$I_A : I_B = 16 : 4$$
$$I_A : I_B = 4 : 1$$

Taraf Intensitas Bunyi

Taraf Intensitas Bunyi

Taraf intensitas bunyi adalah perbandingan logaritmik antara intensitas bunyi dengan intensitas ambang pendengaran.

Taraf intensitas bunyi dinyatakan dalam desibel (dB), didefinisikan sebagai berikut.

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_o} \qquad (2.21)$$

Keterangan:

I : intensitas bunyi

I_o : intensitas ambang pendengaran (10^{-12} w/m^2)

β : taraf intensitas (dB)

Tingkat intensitas bunyi ambang pendengaran adalah 0 dB. Sedangkan ambang rasa sakit karena bunyi adalah 120 dB. Hal ini bersesuaian dengan intensitas bunyi antara 10^{-12} watt/m^2 sampai 1 watt/m^2.

Sebaiknya Tahu

Gambar 2.12 Tingkat kebisingan yang tinggi di kota-kota besar menjadi salah satu sumber polusi suara yang dapat membahayakan kesehatan manusia

Tingkat kebisingan yang sangat tinggi, misalnya suara pesawat terbang dan mesin-mesin pabrik atau lalu lintas di kota-kota besar merupakan sumber polusi suara yang dapat mengakibatkan ketulian, stress, tekanan darah tinggi, dan kesulitan tidur yang dapat membahayakan kesehatan manusia.

Kerja Mandiri

Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!

1. Tentukan cepat rambat bunyi di dalam suatu medium cair dengan massa jenis 800 kg/m^3, jika modulus Bulk cairan tersebut adalah 6,4.10^5 kg/ms^2.
2. Jika nada dasar suatu nada 425 Hz dan cepat rambat bunyi di udara 300 m/s, berapakah panjang pipa organa terbuka yang diperlukan untuk menghasilkan nada ini?

3. Taraf intensitas suara sebuah mesin jet adalah 100 dB. Berapakah taraf intensitas suara jika 10 mesin jet sejenis dihidupkan bersama-sama?

Rangkuman

1. Bunyi merupakan gelombang longitudinal yang dapat merambat melalui berbagai medium, baik gas, cair, maupun padat.
2. Gelombang bunyi dibedakan atas infrasonik, daerah audio, dan ultrasonik.
3. Gelombang bunyi dapat mengalami pemantulan.

$$d = \frac{v \cdot \Delta t}{2}$$

4. Gelombang bunyi dapat mengalami interferensi.
5. Efek Doppler terjadi jika sumber bunyi bergerak relatif terhadap pengamat.

$$f' = \frac{(v \pm v_p)}{(v \pm v_s)} f_0$$

6. Taraf intensitas bunyi adalah perbandingan logaritmik antara intensitas bunyi dengan intensitas ambang pendengaran.

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_o}$$

7. Intensitas bunyi adalah daya rata-rata per satuan luas yang datang tegak lurus arah rambatan.

$$I = \frac{P_{rata\text{-}rata}}{4 \pi r^2}$$

Soal-soal Uji Kompetensi

A. *Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!*

1. Tinggi rendahnya bunyi yang kita dengar tergantung pada . . . .
   a. amplitudo
   b. cepat rambat bunyi
   c. frekuensi
   d. kepadatan medium
   e. intensitas bunyi
2. Pada suhu kamar (300 K) cepat rambat bunyi di udara adalah 320 m/s. Jika suhu dinaikkan hingga 600 K, maka cepat rambat bunyi menjadi . . . .
   a. $640\sqrt{2}$ m/s
   b. 640 m/s
   c. $320\sqrt{2}$ m/s
   d. 320 m/s
   e. 180 m/s
3. Suara guntur terdengar 2 sekon setelah kilat terlihat oleh pengamat. Jika cepat rambat bunyi di udara 340 m/s, maka jarak petir tersebut dari pengamat adalah . . . .
   a. 170 meter
   b. 340 meter
   c. 680 meter
   d. 1.020 meter
   e. 1.360 meter
4. Pada malam hari kita akan lebih jelas mendengarkan bunyi dari tempat yang relatif jauh daripada siang hari. Hal ini disebabkan pada malam hari . . . .
   a. kerapatan udara lebih rendah daripada siang hari
   b. bunyi lebih sedikit dihamburkan
   c. bunyi tidak mengalami interferensi
   d. pada malam hari lebih tenang
   e. tekanan udara lebih rendah
5. Pada percobaan pipa organa terbuka, resonansi pertama tedengar pada ketinggian kolom udara 30 cm, maka resonansi kedua akan terdengar pada ketinggian kolom udara . . . .
   a. 45 cm
   b. 60 cm
   c. 75 cm
   d. 90 cm
   e. 120 cm
6. Nada dasar pipa organa terbuka beresonansi pada nada atas pertama pipa organa tertutup. Perbandingan kolom udara pada kedua pipa adalah . . . .
   a. 1 : 3
   b. 1 : 2
   c. 2 : 1
   d. 3 : 4
   e. 4 : 3
7. Sebuah ambulans dengan sirine yang berbunyi pada frekuensi 900 Hz bergerak mendekati pengamat yang diam. Jika laju mobil 20 m/s dan cepat rambat bunyi di udara 320 m/s maka frekuensi sirine yang didengar adalah . . . .
   a. 880 Hz
   b. 900 Hz
   c. 920 Hz
   d. 940 Hz
   e. 960 Hz
8. Sebuah kapal peneliti hendak mengukur kedalaman laut pada suatu tempat dengan menggunakan sonar *(Sound Navigation and Ranging)*. Pantulan sinyal diterima 4 detik setelah sinyal dipancarkan. Jika cepat rambat bunyi di air 1.450 m/s, kedalaman laut di tempat itu adalah . . . .

a. 5.800 meter
b. 2.900 meter
c. 1.450 meter
d. 725 meter
e. 373 meter

9. Dua pengamat A dan B masing-masing berdiri pada jarak 10 meter dan 20 meter dari suatu sumber bunyi. Perbandingan intensitas bunyi yang didengar keduanya adalah . . . .
   a. 1 : 1
   b. 1 : 2
   c. 1 : 4
   d. 2 : 1
   e. 4 : 1
10. Jika taraf intensitas bunyi dari sebuah mesin jet adalah 110 dB, maka intensitas bunyi mesin tersebut adalah . . . .
   a. 100 watt/m^2
   b. 10 watt/m^2
   c. 1 watt/m^2
   d. 0,1 watt/m^2
   e. 0,01 watt/m^2

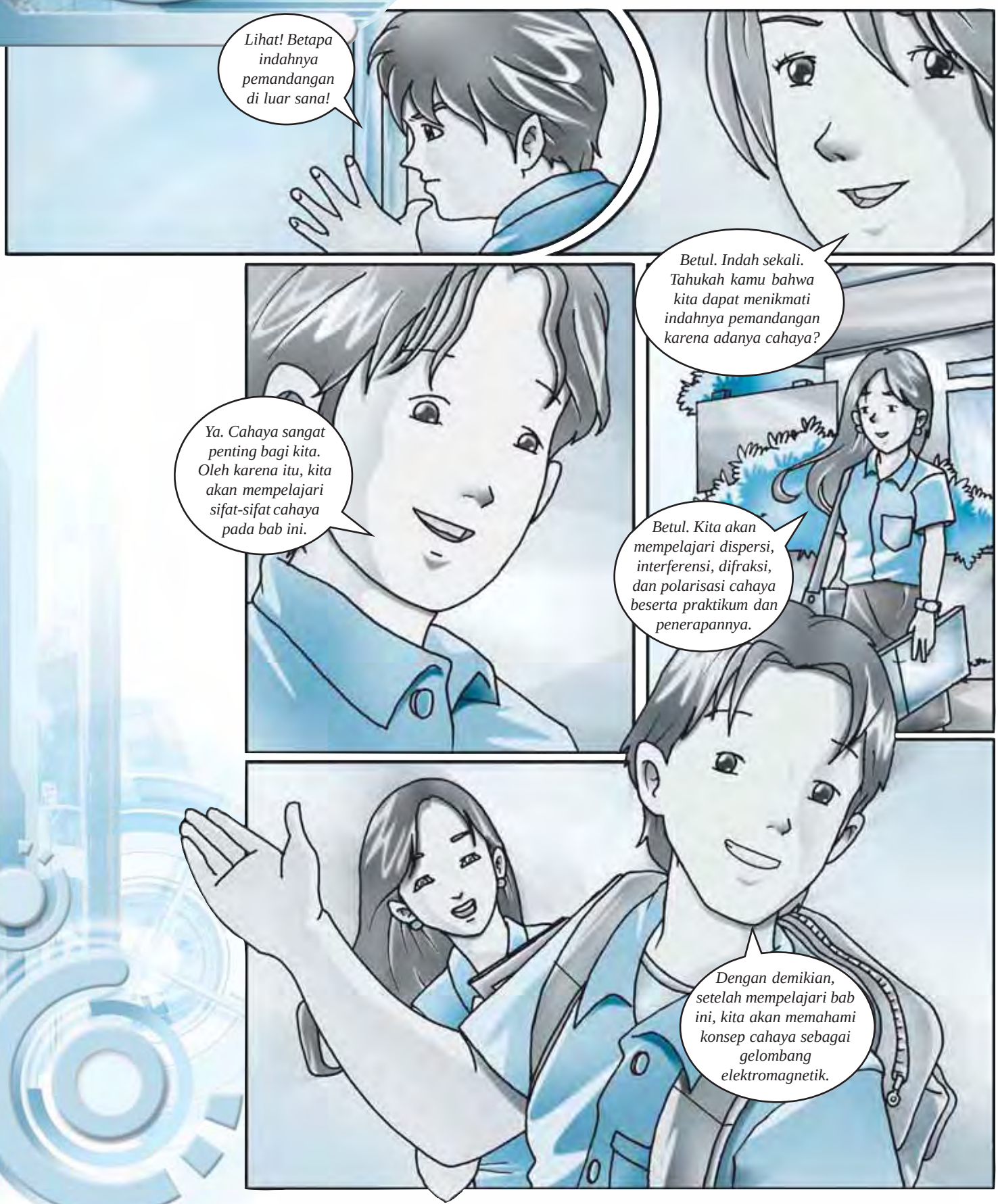
B. *Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!*

1. Tentukan cepat rambat bunyi dalam gas dengan massa jenis 3,5 kg/m^3, dengan tekanan 215 kPa (1 kPa = 10^3 Pa = 10^3 N/m^2) jika konstanta Laplace untuk gas tersebut 1,40!
2. Pada percobaan pipa organa tertutup, resonansi pertama terdengar pada ketinggian kolom udara 12 cm. Tentukan ketinggian kolom udara pada resonansi kedua dan ketiga!
3. Suatu sumber bunyi dari jarak 4 meter memiliki taraf intensitas 40 dB. Tentukanlah taraf intensitas bunyi tersebut jika diukur dari jarak 40 meter!
4. Sebuah sepeda motor memiliki tingkat kebisingan 60 dB. Berapakah tingkat kebisingan dari 10 sepeda motor sejenis jika dihidupkan bersama-sama?
5. Sebuah ambulans bergerak menjauhi pengamat yang diam dengan kecepatan 4 m/s. Jika kecepatan bunyi di udara 340 m/s dan frekuensi sirine 350 Hz, tentukan frekuensi yang didengar oleh pengamat!

BAB

3

CAHAYA SEBAGAI GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK



Gerbang

Gambar 3.1 Cahaya matahari membuat kita dapat menikmati indahnya pemandangan alam

Cahaya membuat hidup kita penuh dengan warna dan keindahan. Apa yang terjadi seandainya Tuhan tidak menciptakan cahaya? Pastinya dunia kita tidak akan pernah ada. Tanpa cahaya kita tidak akan bisa menikmati indahnya pemandangan alam dan warna-warni pelangi setelah hujan. Bahkan tanpa cahaya kita tidak bisa melihat dunia di sekitar kita. Demikianlah arti penting cahaya bagi kita. Berikut ini akan kita pelajari sifat-sifat cahaya dan penerapannya.

Kata Kunci: Dispersi Cahaya – Interferensi Cahaya – Difraksi Cahaya – Polarisasi Cahaya

A. Cahaya

Cahaya memang menarik untuk dipelajari. Sejak berabad-abad yang lalu banyak ahli yang tertarik untuk meneliti cahaya. Sebagai contoh adalah Newton dan Maxwell. Teori Newton tentang cahaya terkenal dengan teori partikel cahaya sedangkan teori Maxwell terkenal dengan gelombang elektromagnetik. Fisikawan lain yang juga tertarik akan cahaya adalah Huygens, Thomas Young, dan Fresnell. Tokoh-tokoh fisika ini cukup banyak memberikan sumbangan terhadap perkembangan teori tentang cahaya.

Cahaya merupakan radiasi gelombang elektromagnetik yang dapat dideteksi mata manusia. Karena itu, cahaya selain memiliki sifat-sifat gelombang secara umum misal dispersi, interferensi, difraksi, dan polarisasi, juga memiliki sifat-sifat gelombang elektromagnetik, yaitu dapat merambat melalui ruang hampa.

Ada dua jenis cahaya, yaitu cahaya polikromatik dan cahaya monokromatik. Cahaya polikromatik adalah cahaya yang terdiri atas banyak warna dan panjang gelombang. Contoh cahaya polikromatik adalah cahaya putih. Adapun cahaya monokromatik adalah cahaya yang hanya terdiri atas satu warna dan satu panjang gelombang. Contoh cahaya monokromatik adalah cahaya merah dan ungu.

B. Dispersi Cahaya

Cahaya memang menjadikan kehidupan ini terlihat indah. Cobalah perhatikan pelangi yang muncul pada saat musim hujan! Ada banyak warna melengkung indah menghias angkasa.

Dispersi Cahaya

Pernahkah kamu mengamati pelangi? Mengapa pelangi terjadi pada saat gerimis atau setelah hujan turun dan matahari tetap bersinar? Peristiwa terjadinya pelangi merupakan gejala dispersi cahaya. Gejala dispersi cahaya adalah gejala peruraian cahaya putih (polikromatik) menjadi cahaya berwarna-warni (monokromatik). Untuk memahami peristiwa dispersi cahaya cobalah lakukan percobaan sederhana berikut ini!

Praktikum 1

Laksanakan kegiatan berikut bersama kelompokmu!

Dispersi Cahaya

A. Tujuan Percobaan

Mengamati terjadinya peristiwa dispersi cahaya.

B. Alat dan Bahan

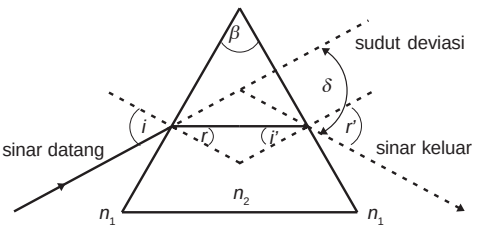
1.	Prisma kaca (FPT 16.19/89)	1 buah
2.	*Ray box* (kotak cahaya)	1 buah
3.	*Power supply* (KAL 60)	1 buah
4.	Diafragma 1 celah	1 buah
5.	Kertas HVS	1 lembar
6.	Penggaris	1 buah

C. Langkah Kerja

1. Susunlah alat-alat seperti gambar berikut!

2. Atur kesesuaian antara *ray box* dengan *power supply* maupun sumber arus PLN!
3. Nyalakan *ray box* kemudian atur prisma sedemikian sehingga sinar yang meninggalkan prisma mengenai lipatan kertas seperti pada gambar!
4. Amatilah sinar yang mengenai prisma! Adakah warna yang muncul pada tempat jatuhnya sinar? Jika ada, catatlah warna-warna tersebut secara berurutan dari ujung ke ujung!
5. Diskusikanlah dengan kelompokmu untuk menarik kesimpulan dari hasil pengamatanmu!
6. Presentasikan hasil kerja kelompokmu di depan kelas!
7. **Ingat**, sebelum kamu meninggalkan ruang praktik, kembalikanlah alat-alat pada tempat semula dengan baik! Jagalah kebersihan lingkungan dan tubuhmu!

Bagaimana hasil praktikum yang telah kamu lakukan? Mari sekarang kita bahas mengenai dispersi cahaya tersebut. Pembiasan cahaya pada prisma merupakan salah satu contoh peristiwa dispersi cahaya. Perhatikan gambar 3.2 di samping!



Gambar 3.2 Sudut deviasi (δ) pada prisma

Seberkas sinar menuju prisma dengan sudut datang *i*. Sinar tersebut kemudian meninggalkan prisma dengan sudut keluar *r*'. Besarnya sudut penyimpangan antara sinar yang menuju prisma dengan sinar yang meninggalkan prisma disebut sebagai sudut deviasi. Besar sudut deviasi tergantung pada besar kecilnya sudut datang. Sudut deviasi terkecil disebut sudut deviasi minimum. Sudut deviasi minimum terjadi jika:

$i = r'$, $r = i'$ serta $i' + r = \beta$

Besarnya sudut deviasi minimum pada prisma dirumuskan sebagai:

$$\delta m = i + r' - \beta \quad \ldots (3.1)$$

Karena $r' = r$ maka:

$$i = \frac{1}{2}(\delta m + \beta) \quad \ldots (3.2)$$

dan

$$r = \frac{1}{2}\beta \quad \ldots (3.3)$$

Sesuai dengan hukum Snellius, kita peroleh :

$$\sin \frac{1}{2}(\delta m + \beta) = n \sin \frac{1}{2}\beta \quad \ldots (3.4)$$

Untuk prisma tipis dengan sudut bias β sangat kecil, persamaan 3.4 dapat ditulis sebagai berikut.

$\frac{1}{2}(\delta m + \beta) = n\frac{1}{2}\beta$

$$\delta m = (n - 1)\beta \quad \ldots (3.5)$$

Keterangan:

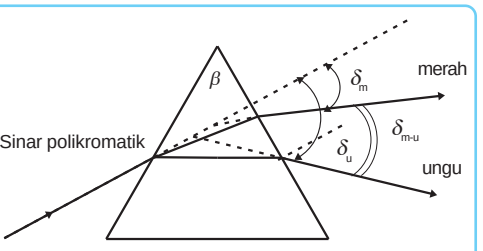
δm : sudut deviasi minimum

n : indeks bias prisma

β : sudut pembias prisma

Di depan telah disinggung bahwa cahaya putih merupakan cahaya polikromatik, artinya cahaya yang terdiri atas banyak warna dan panjang gelombang. Jika cahaya putih diarahkan ke prisma maka cahaya putih akan terurai menjadi cahaya merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila, dan ungu. Cahaya-cahaya ini memiliki panjang gelombang yang berbeda. Setiap panjang gelombang memiliki indeks bias yang berbeda. Semakin kecil panjang gelombangnya semakin besar indeks biasnya. Indeks bias cahaya tersebut adalah ungu > nila > biru > hijau > kuning > jingga > merah.

Perhatikan gambar 3.3 di samping! Seberkas cahaya polikromatik diarahkan ke prisma. Cahaya tersebut kemudian terurai menjadi cahaya merah, jingga, kuning, hijau, biru, nila, dan ungu. Tiap-tiap cahaya mempunyai sudut deviasi yang berbeda. Selisih antara sudut deviasi untuk cahaya ungu dan merah disebut sudut dispersi. Besar sudut dispersi dapat dituliskan sebagai berikut.



Gambar 3.3 Sudut dispersi

$$\phi = \delta m_u - \delta m_m = (n_u - n_m)\beta \quad \ldots (3.6)$$

Pada peristiwa terjadinya pelangi, kita dapat menganggap titik-titik air sebagai prisma-prisma tipis yang sangat banyak jumlahnya. Agar kamu lebih memahami penerapan rumus sudut dispersi, pelajarilah contoh soal berikut! Kemudian kerjakan tugas di bawahnya!

Contoh Soal

Seberkas cahaya putih menembus sebuah prisma tipis dengan sudut pembias 10°, jika indeks bias untuk cahaya merah dan ungu masing-masing 1,49 dan 1,52, tentukanlah besar sudut dispersinya!

Penyelesaian:

Diketahui:

$\beta = 10°$

$n_m = 1{,}49$

$n_u = 1{,}52$

Ditanyakan: $\phi = \ldots ?$

Jawab:

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

$\phi = (1{,}52 - 1{,}49)10°$

$\phi = (0{,}03)10°$

$\phi = 0{,}3°$

Kerja Kelompok

Kerjakan soal berikut bersama kelompokmu!

1. Kamu pernah melihat panggung pertunjukan bukan? Panggung pertunjukkan biasanya dihiasi lampu warna-warni agar tampak indah. Carilah referensi di perpustakaan bagaimana pencampuran cahaya lampu itu menghasilkan warna baru! Diskusikanlah dengan teman sekelompokmu!
2. Presentasikan hasil kerjamu di depan kelas!
3. Buatlah kesimpulan akhir dari kegiatan tersebut!

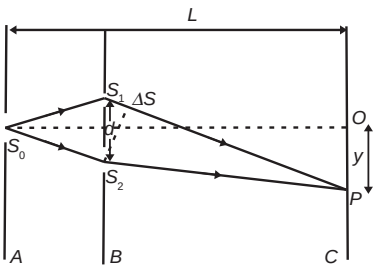
C. Interferensi Cahaya

Interferensi Cahaya

Pembahasan gelombang pada bab terdahulu menyebutkan bahwa salah satu sifat gelombang adalah dapat mengalami interferensi. Bagaimana gejala interferensi dapat terjadi pada gelombang cahaya?

Interferensi cahaya terjadi jika dua berkas cahaya yang koheren (memiliki frekuensi yang sama dan beda fase yang tetap) mengenai suatu titik secara bersamaan. Pada peristiwa interferensi, jika berkas-berkas cahaya yang datang memiliki fase yang sama maka akan terjadi interferensi konstruktif (saling menguatkan) sehingga pada titik tersebut akan terlihat titik terang. Sebaliknya, jika berkas cahaya tersebut memiliki fase yang berlawanan maka akan terjadi interferensi destruktif (saling memperlemah) sehingga pada titik tersebut akan terjadi titik gelap.

Penelitian mengenai interferensi cahaya dilakukan oleh Thomas Young. Young melewatkan cahaya matahari melalui lubang kecil (S_0) yang dibuat pada layar *A*. Sinar yang keluar melebar karena adanya difraksi dan jatuh pada lubang kecil (S_1 dan S_2) yang dibuat pada layar *B*. Dari sini kemudian diteruskan ke layar *C*. Perhatikan gambar 3.4 di samping!



Gambar 3.4 Skema percobaan Young

Mari kita tinjau dua berkas cahaya dari S_1 dan S_2 yang jatuh di titik *P*, seperti pada gambar 3.4. S_1 dan S_2 dapat dianggap sebagai sumber cahaya. Selisih panjang lintasan optis keduanya adalah:

$$\Delta s = S_1P - S_2P = d \sin \theta \quad \ldots (3.7)$$

dengan

$$\sin \theta = \frac{\Delta s}{d} = \frac{y}{L} \quad \ldots (3.8)$$

Pada titik *P* akan terjadi pita terang jika berkas cahaya yang jatuh memiliki fase yang sama atau kelipatan bulat panjang gelombangnya (λ). Dengan demikian jarak titik *P* dari pusat terang *O* adalah:

$$y = \frac{Ln\lambda}{d} \qquad \ldots (3.9)$$

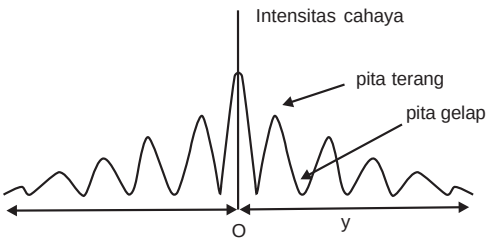
Keterangan:

y : jarak titik *P* dari pusat terang *O* (m)
d : jarak S_1 dan S_2 (m)
L : jarak sumber cahaya ke layar (m)
λ : panjang gelombang cahaya (m)
n : 0, 1, 2, ... (khusus untuk *n* = 0, adalah titik terang pusat)

Pada titik *P* akan terjadi pita gelap jika berkas cahaya yang jatuh memiliki beda fase setengah periode atau selisih lintasan optis kelipatan ganjil setengah panjang gelombang. Sehingga persamaan 3.9 menjadi:

$$y = \left(\frac{2n-1}{2}\right)\frac{L\lambda}{d} \qquad \ldots (3.10)$$

Pola pita terang dan gelap pada interferensi cahaya akan lebih mudah diamati dengan menggunakan grafik intensitas cahaya seperti gambar 3.5 di samping. Untuk lebih jelasnya, perhatikan contoh soal di bawah ini!



Gambar 3.5 Pola intensitas cahaya pada peristiwa interferensi cahaya.

Contoh Soal

Pada percobaan Young digunakan gelombang cahaya dengan panjang gelombang 4.500 $\mathring{A}$ dan jarak antara celah dengan layar 2 meter. Jika jarak antarcelah 0,5 mm, tentukan jarak pita terang kedua dari pusat terang!

Penyelesaian:

Diketahui:

$\lambda = 4.500\ \mathring{A} = 4{,}5 \cdot 10^{-7}$ m ($1\ \mathring{A} = 10^{-10}$ m)

$L = 2$ m

$d = 0{,}5$ mm $= 0{,}5 \cdot 10^{-4}$ m

Ditanyakan: y_2 = . . .?

Jawab:

$$y_2 = \frac{Ln\lambda}{d} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 4{,}5 \cdot 10^{-7}}{0{,}5 \cdot 10^{-4}} = 3{,}6 \cdot 10^{-3}\ \text{m} = 3{,}6\ \text{mm}$$

Sebagai pemantapan pemahamanmu terhadap interferensi cahaya, kerjakanlah soal di bawah ini!

Kerja Mandiri 1

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

1. Jarak pita terang kedua dari pusat terang pada suatu percobaan interferensi adalah 7,35 mm. Jika panjang gelombang cahaya yang digunakan adalah 4.900 Å dan jarak antara celah dengan layar 1,5 m, tentukan jarak antarcelah!
2. Jarak pita terang pertama dari pusat terang pada suatu percobaan interferensi adalah 3,1 mm. Jika jarak antara celah dengan layar 2 m dan jarak antarcelah 0,3 mm, tentukan panjang gelombang cahaya yang digunakan!
3. Cahaya dengan panjang gelombang 4.500 Å digunakan pada sebuah percobaan interferensi. Jika jarak antara celah dengan layar 1,5 m dan jarak antarcelah 0,3 mm, tentukan jarak pita gelap ketiga dari pusat terang!

D. Difraksi Cahaya

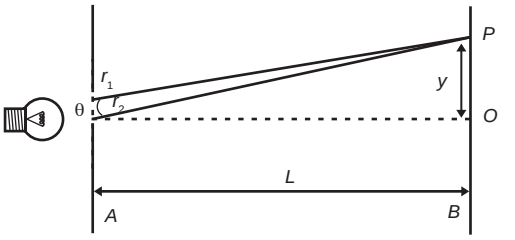
Pada jarak tertentu mata kita sulit membedakan posisi dua nyala lampu yang sangat berdekatan. Coba kamu perhatikan mengapa hal ini dapat terjadi? Gejala ini dikarenakan diameter pupil mata kita sangat sempit. Akibatnya adalah cahaya dua lampu tersebut ketika sampai ke mata kita mengalami difraksi. Apakah difraksi cahaya itu?

Difraksi Cahaya

Difraksi cahaya adalah peristiwa pelenturan cahaya yang akan terjadi jika cahaya melalui celah yang sangat sempit. Kita dapat melihat gejala ini dengan mudah pada cahaya yang melewati sela jari-jari yang kita rapatkan kemudian kita arahkan pada sumber cahaya yang jauh, misalnya lampu neon. Atau dengan melihat melalui kisi tenun kain yang terkena sinar lampu yang cukup jauh.

1. Difraksi Celah Tunggal

Gambar 3.6 memperlihatkan gelombang cahaya yang datang pada sebuah celah yang sangat sempit.



Gambar 3.6 Skema difraksi pada celah tunggal

Pada titik *O* di layar *B* semua sinar memiliki panjang lintasan optis yang sama. Karena semua sinar yang jatuh di *O* memiliki fase yang sama maka titik *O* memiliki intensitas maksimum.

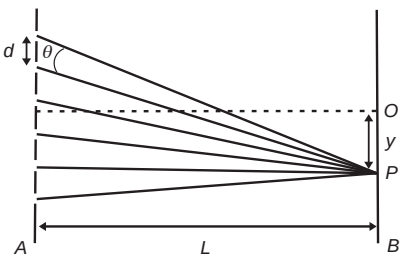
Sekarang kita tinjau titik *P*. Sinar meninggalkan celah dengan sudut θ. Sinar r_1 berasal dari bagian atas celah dan sinar r_2 berasal dari pusatnya. Jika dipilih sudut θ sedemikian sehingga selisih lintasannya adalah $\frac{1}{2}\lambda$ maka r_1 dan r_2 berlawanan fase dan tidak memberikan efek apapun pada *P*. Setiap sinar dari setengah bagian atas celah akan dihapuskan oleh pasangannya yang berasal dari bagian bawah, yaitu mulai dari titik $\frac{1}{2}d$ bagian bawah. Titik *P* akan minimum pada pola difraksi dan memiliki intensitas nol. Syarat keadaan ini adalah:

$$\frac{1}{2} d \sin\theta = n \frac{1}{2}\lambda \text{ atau } d \sin\theta = n\lambda \quad \ldots (3.11)$$

Pita terang utama *O* akan menjadi lebih lebar jika celah dipersempit. Jika lebar celah sama dengan panjang gelombang (λ) maka minimum pertama akan terjadi pada sudut $\theta = 90^o$.

2. Difraksi pada Kisi

Difraksi cahaya juga terjadi jika cahaya melalui banyak celah sempit terpisah sejajar satu sama lain dengan jarak konstan. Celah semacam ini disebut kisi difraksi atau sering disebut dengan kisi.



Gambar 3.7 Skema difraksi pada kisi

Di titik *P* akan terjadi terang jika memenuhi persamaan berikut.

$$d \sin\theta = n\lambda \text{ atau } \frac{d \cdot y}{L} = n\lambda \quad \ldots (3.12)$$

Keterangan:

d : konstanta kisi = $\frac{1}{N}$, dengan *N* = jumlah celah/cm

Dengan menggunakan prinsip difraksi cahaya pada kisi kita dapat menentukan panjang gelombang cahaya melalui percobaan berikut.

Praktikum 2

Laksanakan percobaan berikut ini bersama kelompokmu!

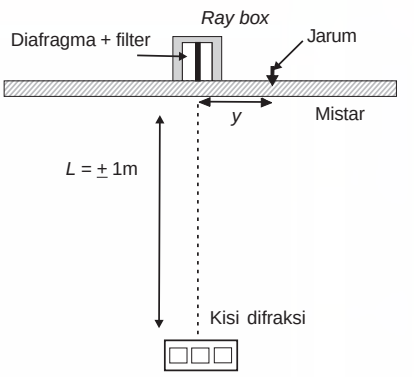
Difraksi pada Kisi

A. Tujuan Percobaan

1. Mengamati gejala difraksi cahaya pada kisi.
2. Menentukan panjang gelombang cahaya kuning.

B. Alat dan Bahan

1. Kisi difraksi 1 buah
2. *Ray box* 1 buah
3. *Power supply* 1 buah
4. Diafragma 1 celah 1 buah
5. Mistar 1 meter 1 buah
6. Filter cahaya kuning 1 buah
7. Jarum pentul 1 buah



C. Langkah Kerja

1. Susunlah alat dan bahan seperti pada gambar!
2. Hubungkan *ray box* dengan *power supply* pada tegangan yang sesuai!
3. Hubungkan *power supply* dengan arus PLN! Pastikan bahwa *power supply* dalam keadaan mati (*off*)!
4. Hidupkanlah *ray box*!
5. Dengan menggunakan kisi difraksi, lihatlah diafragma pada *ray box*!
6. Dengan menggunakan jarum pentul, tentukanlah posisi terang pertama, kedua, dan seterusnya!
7. Ukurlah jarak jarum pentul ke titik tengah diafragma!
8. Catatlah hasilnya ke dalam tabel seperti berikut!

   Tabel Data Hasil Pengamatan

No.	*d* (m)	*L* (m)	*y* (m)
1.			
2.			
3.			

9. Dengan menggunakan persamaan 3.4, tentukanlah panjang gelombang cahaya kuning!
10. Presentasikan hasil pengamatan yang telah kamu lakukan di depan kelas!
11. **Ingat**, sebelum meninggalkan ruang praktik, kembalikanlah peralatan laboratorium pada tempatnya dalam keadaan baik. Jagalah kebersihan ruangan dan tubuhmu!

Kerja Mandiri 2

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

Seberkas cahaya polikromatik mempunyai spektrum cahaya ungu pada λ = 400 nm dan cahaya merah pada λ = 700 nm. Jika cahaya tersebut dikenakan pada kisi dengan 400 garis/mm, tentukan:

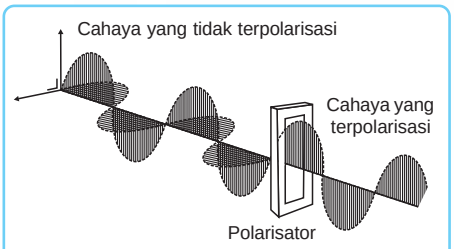
a. konstanta kisi,
b. lebar sudut orde pertama,
c. lebar spektrum orde pertama.

E. Polarisasi Cahaya

Polarisasi Cahaya

Pada pembahasan sebelumnya telah disebutkan bahwa cahaya termasuk gelombang tranversal. Hal ini dibuktikan oleh peristiwa polarisasi cahaya. Polarisasi cahaya adalah pembatasan atau pengutuban dua arah getar menjadi satu arah getar. Perhatikan gambar 3.8!

Gelombang cahaya yang belum terpolarisasi mempunyai dua arah getar. Ketika cahaya tersebut dilewatkan pada sebuah celah (polarisator), cahaya mengalami pengutuban (polarisasi) sehingga cahaya hanya mempunyai satu arah getar. Polarisasi cahaya dapat terjadi karena beberapa hal berikut.



Gambar 3.8 Polarisasi cahaya

1. Penyerapan

Polarisasi akibat penyerapan terjadi jika cahaya melalui zat yang dapat memutar bidang polarisasi gelombang cahaya. Zat semacam ini disebut zat optik aktif. Contoh zat ini adalah larutan gula.

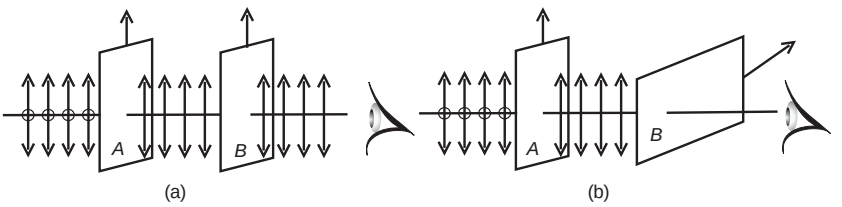
Gambar 3.9 menunjukkan fenomena polarisasi akibat penyerapan. Anggaplah seberkas cahaya tak terpolarisasi menembus filter *polaroid A*. Setelah melalui *A* hanya cahaya yang memiliki arah getar tertentu saja yang dapat menembus. Cahaya yang hanya memiliki arah getar tertentu ini disebut cahaya terpolarisasi. Ketika kedudukan bidang polarisasi *A* sejajar dengan *B*, cahaya diteruskan oleh *polaroid B*, sehingga mata dapat melihat cahaya atau benda. Selanjutnya

Sebaiknya Tahu

Film Tiga Dimensi

Film ini dibuat dengan menggunakan dua buah kamera atau kamera khusus dengan dua lensa. Di dalam gedung bioskop, kedua film diproyeksikan pada layar secara simultan. Sebuah filter polarisasi yang diletakkan di depan lensa proyektor sebelah kiri akan meneruskan gelombang cahaya dari gambar pada suatu arah getar tertentu. Bersamaan dengan itu filter lain di bagian kanan akan meneruskan gelombang cahaya tegak lurus arah getar yang dihasilkan oleh filter pertama. Penonton mengenakan kacamata khusus yang berfungsi sebagai filter. Filter ini akan menyebabkan kesan gambar yang diterima oleh mata kiri dan kanan akan berbeda. Sehingga kesan gambar tiga dimensi akan terasa.

polaroid B diputar 90° terhadap sumbu sinar datang. Bidang polarisasi *B* menjadi tegak lurus bidang polarisasi *A* atau tegak lurus bidang getar cahaya terpolarisasi. Pada keadaan ini mata tidak dapat melihat cahaya atau benda karena cahaya diserap oleh *polaroid B*.



Gambar 3.9 Polarisasi cahaya akibat penyerapan (a) bidang polarisasi *A* sejajar dengan *B* dan (b) bidang polarisasi *B* diputar 90° terhadap sumbu sinar datang.

Untuk lebih jelasnya, mari kita melakukan praktik berikut!

Praktikum 3

Laksanakan bersama kelompokmu!

Polarisasi Cahaya

A. Tujuan

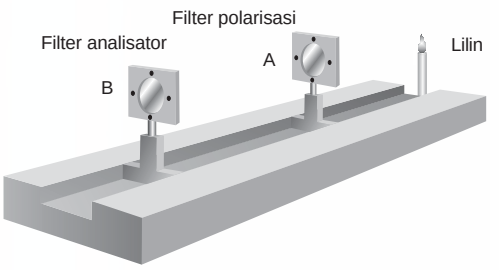
Mengamati terjadinya polarisasi cahaya.

B. Alat dan Bahan

1. Bangku optik 1 buah
2. Filter polarisasi 1 buah
3. Lilin 1 buah
4. Filter analisator 1 buah

C. Langkah Kerja

1. Susunlah alat dan bahan seperti gambar berikut!



2. Aturlah agar kedua filter menunjukkan angka nol!
3. Amatilah sinar lilin yang menembus filter dari jendela filter B!
4. Putarlah perlahan-lahan filter B, amati apa yang terjadi pada cahaya lilin!
5. Catatlah pada sudut berapa saja nyala lilin terlihat paling gelap!
6. Diskusikan hasilnya dengan kelompokmu!
7. Buatlah kesimpulan dari hasil pengamatan yang telah kamu lakukan!

8. Presentasikan hasil pengamatan yang telah kamu lakukan di depan kelas!
9. **Peringatan:**
   a. Hati-hatilah dalam menggunakan peralatan laboratorium.
   b. Jaga kebersihan lingkungan dan tubuhmu!
   c. Setelah selesai, kembalikan peralatan pada tempat semula dalam keadaan baik.

2. Hamburan

Salah satu gejala polarisasi cahaya akibat hamburan adalah langit yang berwarna biru. Hal ini disebabkan gelombang cahaya warna biru lebih banyak dihamburkan oleh atmosfer. Atmosfer kita cenderung lebih banyak menghamburkan cahaya dengan panjang gelombang yang pendek daripada panjang gelombang yang panjang.

Gambar 3.10 Langit berwarna biru sebagai akibat polarisasi cahaya karena hamburan

3. Pemantulan

Ketika cahaya mengenai bidang batas dua medium optik dengan kerapatan berbeda, sebagian cahaya akan dipantulkan. Hal ini dapat menimbulkan terjadinya polarisasi. Tingkat polarisasi bergantung pada sudut datang dan indeks bias kedua medium. Cahaya yang terpantul akan terpolarisasi seluruhnya ketika sudut datang sedemikian sehingga antara sinar bias dan sinar pantul saling tegak lurus.

Berdasarkan hukum Snellius, besarnya sudut datang saat terjadi polarisasi adalah:

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta'_p \qquad \ldots \ (3.13)$$

Karena sinar bias dan sinar pantul saling tegak lurus maka

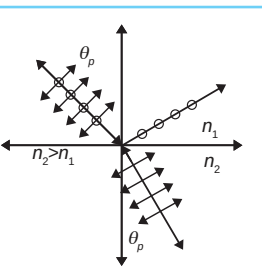
$$\theta_p + \theta'_p = 90°$$
$$\theta'_p = 90° - \theta_p$$

Dengan demikian persamaan 3.13 menjadi:

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin(90° - \theta_p)$$
$$\frac{\sin \theta_p}{\sin (90^o - \theta_p)} = \frac{n_1}{n_2}$$

Berdasarkan trigonometri $\sin (90° - \theta_p) = \cos \theta_p$, sehingga

$$\frac{\sin \theta_p}{\cos \theta_p} = \frac{n_1}{n_2}$$
$$\tan \theta_p = \frac{n_1}{n_2} \qquad \ldots \ (3.14)$$



Gambar 3.11 Polarisasi akibat pemantulan

Persamaan 3.14 dikenal sebagai hukum Brewster. Perhatikanlah contoh soal dan pembahasannya berikut ini!

Contoh Soal

Tentukanlah besar sudut datang polarisasi pada kaca dengan indeks bias 1,5!

Penyelesaian:

Diketahui:

$n_1 = 1$

$n_2 = 1{,}5$

Ditanyakan: θ_p = . . .?

Jawab:

$$\tan \theta_p = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1{,}5}{1} = 1{,}5$$

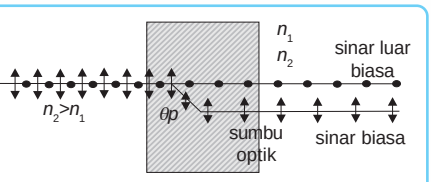
$\theta_p = 56{,}3°$

4. Pembiasan Ganda

Gejala pembiasan ganda merupakan fenomena rumit yang terjadi pada kristal kalsit atau kristal plastik yang ditegangkan, misalnya selofen. Pada kebanyakan zat, laju cahaya adalah sama untuk semua arah. Pada kristal kalsit, laju cahaya bergantung arah rambat pada material tersebut. Zat semacam ini disebut zat isotropik.

Ketika berkas cahaya masuk pada zat isotropik, berkas tersebut terpisah menjadi dua bagian yang disebut berkas sinar biasa dan sinar luar biasa. Berkas-berkas ini terpolarisasi dalam arah yang saling tegak lurus dan berjalan dengan kecepatan yang berbeda.

Ada arah tertentu pada zat di mana kedua cahaya merambat dengan kecepatan yang sama. Arah ini disebut sumbu optik. Saat cahaya membentuk sudut terhadap sumbu optik, berkas-berkas cahaya tersebut akan berjalan pada arah yang berbeda dan keluar secara terpisah pada ruang. Jika bahan tersebut diputar, berkas cahaya yang luar biasa akan berputar di ruang.



Gambar 3.12 Peristiwa polarisasi akibat pembiasan ganda

F. Penerapan Cahaya dalam Teknologi

Seperti telah diungkapkan sebelumnya bahwa cahaya sangat penting bagi kita. Oleh karena itu para ilmuwan terus mempelajari tentang cahaya. Sejauh ini para ilmuwan telah menghasilkan penemuan-penemuan baru yang menakjubkan, misalnya laser, serat optik, dan hologram. Berikut ini akan kita pelajari penemuan-penemuan tersebut.

1. Laser

Laser adalah akronim dari *light amplification by stimulated emission of radiation*. Laser merupakan sumber cahaya yang memancarkan berkas cahaya yang koheren. Laser termasuk cahaya monokromatik. Laser mempunyai intensitas dan tingkat ketelitian yang sangat tinggi, sehingga laser banyak digunakan dalam berbagai peralatan.

Laser pertama kali dikembangkan pada tahun 1960. Penerapan laser dalam kehidupan sehari-hari antara lain sebagai pemindai *barcode* di supermarket, alat pemutar CD atau DVD, *laser printer*, dan dioda laser. Di bidang kedokteran, laser digunakan sebagai pisau bedah dan untuk menyembuhkan gangguan akomodasi mata.

2. Serat Optik

Selain contoh-contoh di atas, pemanfaatan laser juga dapat diterapkan dalam bidang telekomunikasi. Dalam bidang telekomunikasi, laser digunakan untuk mengirim sinyal telepon dan internet melalui suatu kabel khusus yang disebut serat optik. Serat optik merupakan suatu serat transparan yang digunakan untuk mentransmisi cahaya, misalnya laser. Dengan menggunakan serat optik, data yang dikirim akan lebih cepat sampai. Karena kecepatan data tersebut sama dengan kecepatan cahaya, yaitu $3 \cdot 10^8$ m/s.

Sebaiknya Tahu

Komputer Optik

Dalam komputer optik, informasi dibawa oleh denyut cahaya yang cepat, bukan oleh aliran elektron yang lambat. Seperti kabel serat optik, komputer optik dapat membawa banyak sinyal yang berbeda dalam waktu yang bersamaan (secara paralel). Proses ini dikenal dengan pemrosesan paralel yang akan menjadikan komputer optik lebih kuat daripada komputer elektronik yang hanya melakukan satu pekerjaan dalam satu waktu (dikenal sebagai pemrosesan seri). (*Sumber: Jejak Sejarah Sains: Cahaya*, Pakar Raya. *2006.*)

3. Hologram

Perkembangan laser juga merambah bidang fotografi. Penggunaan laser dalam fotografi dikenal sebagai holografi. Holografi adalah pembuatan gambar-gambar tiga dimensi dengan menggunakan laser. Hasil yang diperoleh pada proses holografi disebut hologram. Mekanisme holografi adalah sebagai berikut. Objek yang akan dibuat hologram disinari dengan laser. Objek tersebut kemudian memantulkan sinar dari laser. Perpaduan antara laser dengan sinar yang dipantulkan objek akan memberikan efek interferensi. Efek interferensi inilah yang memberikan bayangan objek tiga dimensi.

Materi di atas hanyalah sebagian penerapan cahaya dalam bidang teknologi. Cobalah kamu cari contoh lain penerapan cahaya dalam berbagai bidang di perpustakaan atau di internet!

Rangkuman

1. Cahaya termasuk gelombang tranversal sehingga cahaya mengalami gejala dispersi, interferensi, difraksi, dan polarisasi.
2. Dispersi cahaya terjadi karena perbedaan indeks bias masing-masing warna cahaya penyusun cahaya putih.

   $n_m < n_j < n_k < n_h < n_b < n_n < n_u$
3. Interferensi cahaya terjadi jika dua berkas cahaya yang koheren (memiliki frekuensi yang sama dan beda fase yang tetap) mengenai suatu titik secara bersamaan.
4. Difraksi cahaya terjadi jika cahaya melalui banyak celah sempit terpisah sejajar satu sama lain dengan jarak konstan.
5. Polarisasi cahaya adalah pengutuban arah getar gelombang cahaya yang disebabkan oleh penyerapan, pemantulan, hamburan, dan pembiasan ganda.
6. Penerapan cahaya dalam teknologi antara lain adalah laser, serat optik, dan holografi.

Soal-soal Uji Kompetensi

A. ***Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!***

1. Sebuah prisma tipis dengan sudut pembias 12^o dan indeks bias 1,50. Besarnya sudut datang agar terjadi deviasi minimum adalah . . . .
   a. 12°
   b. 9°
   c. 6°
   d. 3°
   e. 1,5°
2. Sebuah prisma tipis dengan indeks bias 1,5 memiliki deviasi minimum di udara 4°. Deviasi minimum prisma tersebut jika di dalam air ($n_{air} = \frac{4}{3}$) adalah . . . .
   a. 8°
   b. 4°
   c. 2°
   d. 1°
   e. 0,5°
3. Seberkas cahaya putih menembus prisma dengan sudut pembias 10^o. Jika indeks bias cahaya merah dan ungu masing-masing 1,51 dan 1,53 maka besarnya sudut dispersi pada prisma tersebut adalah . . . .
   a. 0,1°
   b. 0,2°
   c. 0,3°
   d. 0,4°
   e. 0,5°
4. Pada percobaan Young digunakan gelombang cahaya dengan panjang gelombang 4.500 $\mathring{A}$ dengan jarak antara celah dengan layar 2 meter. Jika jarak antarcelah 0,5 mm maka jarak pita terang ketiga dari pusat terang adalah . . . .
   a. 0,9 mm
   b. 1,8 mm
   c. 2,7 mm
   d. 3,6 mm
   e. 5,4 mm
5. Pita gelap ketiga terletak pada jarak 2 mm dari pusat terang pada percobaan interferensi dengan menggunakan cahaya 540 nm (1 nm = 10^{-9} m). Jika jarak antara celah dan layar 1 meter maka lebar celah yang digunakan adalah . . . .
   a. 0,3 mm
   b. 0,4 mm
   c. 0,5 mm
   d. 0,6 mm
   e. 0,7 mm
6. Seorang siswa melakukan percobaan difraksi cahaya dengan menggunakan kisi difraksi 300 garis/mm. Ia mendapatkan pita terang pertama untuk suatu cahaya monokromatik berjarak 1,8 cm dari pusat terang. Panjang gelombang cahaya yang ia gunakan adalah . . . .
   a. 4.000 angstrom
   b. 4.500 angstrom
   c. 5.000 angstrom
   d. 5.500 angstrom
   e. 6.000 angstrom
7. Hal-hal berikut adalah akibat dari peristiwa difraksi cahaya, **kecuali** . . . .
   a. bayangan pada alat optik menjadi kabur
   b. terbatasnya daya pemisah alat optik
   c. terjadinya biasan warna pelangi pada ujung bayangan
   d. terbentuknya lingkaran pelangi di sekeliling bulan
   e. mata kita tak mampu memisahkan dua sumber cahaya yang sangat berdekatan

8. Jika tak ada atmosfer yang menyelubungi bumi maka pada siang hari langit akan berwarna . . . .
   a. merah
   b. kuning
   c. biru
   d. putih
   e. hitam
9. Suatu medium optik memiliki indeks bias $\sqrt{3}$ maka sudut datang sinar datang agar terjadi polarisasi cahaya akibat pemantulan adalah . . . .
   a. 30°
   b. 45°
   c. 60°
   d. 75°
   e. 90°
10. Berikut ini adalah gejala yang timbul akibat polarisasi cahaya, **kecuali** . . . .
   a. langit terlihat biru pada siang hari
   b. pemutaran bidang getar pada larutan gula
   c. cahaya kelihatan lebih redup setelah menembus kaca *rayban*
   d. pantulan cahaya yang datang dengan sudut tertentu pada medium optik kelihatan lebih redup
   e. adanya garis-garis gelap pada spektrum matahari

B. ***Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!***

1. Seberkas cahaya monokromatik dilewatkan pada sebuah prisma dengan sudut pembias 60^o. Jika indeks bias untuk warna merah dan ungu masing-masing 1,51 dan 1,53, tentukanlah sudut dispersi pada prisma!
2. Dua buah celah terpisah pada jarak 1 mm satu sama lain. Seberkas cahaya dengan panjang gelombang 700 nm melewati celah tersebut sehingga terjadi pola interferensi cahaya. Jika jarak celah ke layar 2 meter, tentukanlah jarak dua pita terang yang berdekatan!
3. Seberkas cahaya putih dilewatkan pada kisi difraksi 1.000 garis/cm. Jika panjang gelombang cahaya merah dan ungu masing-masing 7.000 angstrom dan 4.000 angstrom, serta jarak kisi ke layar 1 meter, tentukanlah jarak pita merah dan ungu untuk orde pertama!
4. Indeks bias kaca plan paralel yang terbuat dari kaca kerona (*crown*) adalah 1,52. Tentukanlah sudut datang sinar datang agar terjadi polarisasi!
5. Jelaskan cara pengukuran jarak bumi–bulan dengan menggunakan sinar laser!

BAB 4

LISTRIK STATIS

Gerbang

Gambar 4.1 Petir merupakan loncatan muatan listrik akibat perbedaan potensial antara awan dengan bumi

Pada waktu cuaca mendung atau hujan, sering terjadi petir. Bagaimana petir terjadi? Petir merupakan loncatan muatan listrik akibat perbedaan potensial yang sangat besar dari awan ke bumi yang disertai energi yang sangat besar. Muatan listrik di awan merupakan muatan listrik statis. Bagaimana muatan itu terbentuk?

Untuk mengetahui lebih jauh tentang muatan listrik serta perilaku muatan, mari kita pelajari uraian di bawah ini!

Kata Kunci: Muatan Listrik – Hukum Coulomb – Medan Listrik – Hukum Gauss – Potensial Listrik

A. Muatan Listrik

Muatan Listrik

Adanya petir menunjukkan bahwa awan dapat memiliki muatan listrik. Muatan listrik pada awan ternyata dapat berpindah, baik dari awan yang satu ke awan yang lain, atau dari awan ke bumi. Sebenarnya, bagaimanakah muatan listrik itu terjadi?

Penelitian terhadap muatan listrik dan kelistrikan mempunyai sejarah yang sangat panjang. Orang Yunani kuno telah mengamati bahwa setelah batu *amber* digosok, batu tersebut dapat menarik benda-benda yang kecil. Hal itu menunjukkan bahwa batu *amber* setelah digosok menjadi bermuatan listrik.

Agar lebih mudah memahami sifat muatan listrik, kita dapat melakukan percobaan sederhana berikut.

Praktikum 1

Muatan Listrik Statis

A. Tujuan

Mengamati sifat muatan listrik statis.

B. Alat dan Bahan :

1. Batang kaca — 2 buah
2. Bulu atau kain wol — 1 helai
3. Kain sutera — 1 potong
4. Statif — 1 buah
5. Benang — ± 50 cm

C. Langkah Percobaan

1. Gantungkan batang kaca pertama pada statif!
2. Gosok masing-masing batang kaca dengan kain wol!
3. Dekatkan batang kaca kedua dengan batang kaca pertama! Amati apa yang terjadi!
4. Gosok masing-masing batang kaca dengan kain sutra!
5. Dekatkanlah batang kaca kedua dengan batang kaca pertama! Amati apa yang terjadi!
6. Gosok batang kaca pertama dengan kain wol dan batang kaca kedua dengan kain sutra, kemudian dekatkan batang kaca kedua dengan batang kaca pertama! Amati apa yang terjadi!
7. Isikan hasil pengamatanmu pada tabel seperti berikut!

No	Batang 1		Batang 2		Keterangan	
	Wol	Sutra	Wol	Sutra	Tarik	Tolak
1						
2						
3						

8. Diskusikan dengan kelompokmu hasil pengamatan yang telah kamu lakukan!
9. Buatlah kesimpulan berdasarkan hasil pengamatanmu!

Peringatan:

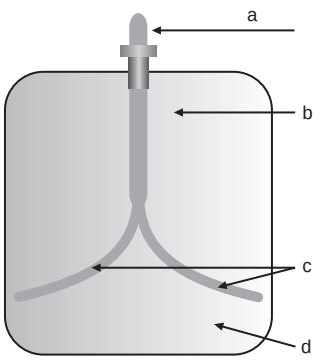
a. Lakukan setiap langkah percobaan dengan hati-hati dan cermat!
b. Jagalah kebersihan alat dan lingkungan!
c. Setelah selesai, kembalikan alat-alat percobaan pada tempat semua!

Bagaimana kesimpulan hasil percobaanmu? Jika kamu melakukan percobaan dengan benar kamu akan mengetahui bahwa dua batang kaca yang diberi muatan yang sama akan tolak-menolak, sedangkan dua batang kaca yang berbeda muatan akan tarik-menarik.

Benjamin Franklin (1706–1790) adalah fisikawan yang pertama menamai muatan yang diterima batang kaca yang digosok dengan kain sutra sebagai muatan positif, dan muatan yang diterima batang kaca yang digosok dengan bulu atau kain wol sebagai muatan negatif.

Jika dua atau lebih muatan yang sama saling didekatkan maka muatan-muatan tersebut akan saling menolak. Sebaliknya, jika muatan positif didekatkan dengan muatan negatif maka muatan-muatan tersebut akan tarik-menarik.

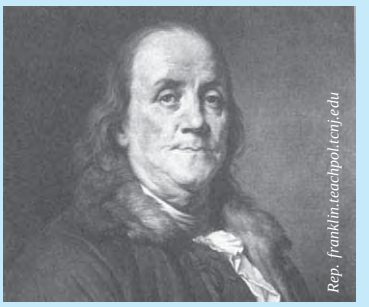
Alat untuk menguji suatu benda bermuatan atau tidak adalah elektroskop. Elektroskop memanfaatkan prinsip tolak-menolak antara muatan yang sejenis dan tarik-menarik antarmuatan yang tidak sejenis. Bagian-bagian elektroskop ditunjukkan pada gambar 4.2.



Keterangan:
a. kepala elektroskop
b. badan elektroskop
c. kaki elektroskop
d. gelas

Gambar 4.2. Bagan elektroskop

Sebaiknya Tahu



Gambar 4.3 Benjamin Franklin

Benjamin Franklin (1706–1790)

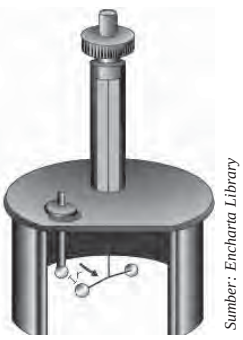
Pada tahun 1747 Benjamin Franklin memulai eksperimen tentang kelistrikan dengan alat sederhana yang ia terima dari Peter Collinson ketika dia berada di Inggris.

Hasil percobaannya yang terkenal adalah ketika ia mengaitkan sebatang kunci pada layang-layang pada tahun 1752. Kunci tersebut menjadi bermuatan akibat tersambar petir. Dari sinilah teori tentang elektrostatis berkembang.

B. Hukum Coulomb

Pada uraian di atas dinyatakan bahwa dua muatan sejenis, seperti 2 batas kaca yang sama-sama telah digosok kain wol, jika didekatkan akan tolak-menolak. Namun seberapa besar gaya tolak-menolak itu? Apakah sama besar gaya tolak-menolaknya, jika waktu menggosok kain wol diperlama atau dipersingkat?

Besarnya gaya oleh suatu muatan terhadap muatan lain telah dipelajari oleh Charles Augustin Coulomb. Peralatan yang digunakan pada eksperimennya adalah neraca puntir yang mirip dengan neraca puntir yang digunakan oleh Cavendish pada percobaan gravitasi. Bedanya, pada neraca puntir Coulomb massa benda digantikan oleh bola kecil bermuatan.



Gambar 4.4 Neraca puntir yang digunakan oleh Coulomb dalam eksperimennya

Untuk memperoleh muatan yang bervariasi, Coulomb menggunakan cara induksi. Sebagai contoh, mula-mula muatan pada setiap bola adalah q_o, besarnya muatan tersebut dapat dikurangi hingga menjadi $\frac{1}{2}q_o$ dengan cara membumikan salah satu bola agar muatan terlepas kemudian kedua bola dikontakkan kembali. Hasil

eksperimen Coulomb menyangkut gaya yang dilakukan muatan titik terhadap muatan titik lainnya. Hasil eksperimen Coulomb dinyatakan sebagai hukum Coulomb dan dirumuskan sebagai berikut.

Hukum Coulomb

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad \ldots (4.1)$$

Keterangan:

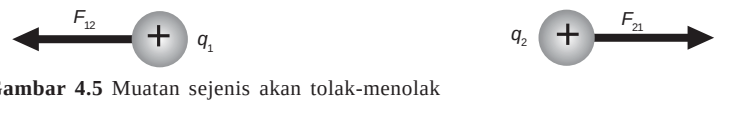
F : gaya Coulomb (N)
q_1 dan q_2 : muatan (c)
r : jarak (m)
k : konstanta yang besarnya $9 \cdot 10^9$ N.m^2/C^2

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

Keterangan:

ε_0 : permisivitas ruang hampa = $8{,}854 \cdot 10^{-12}$ C^2/N.m^2

Perhatikan gambar 4.5 dan 4.6 di bawah ini!



Gambar 4.5 Muatan sejenis akan tolak-menolak

Gambar 4.6 Muatan yang berlawanan akan tarik-menarik

Jika kedua muatan merupakan muatan sejenis maka gaya yang bekerja bersifat tolak-menolak (gambar 4.5). Jika kedua muatan mempunyai tanda yang berlawanan, gaya yang bekerja bersifat tarik-menarik (gambar 4.6).

Hukum Coulomb mempunyai kesamaan dengan hukum gravitasi Newton. Persamaannya terletak pada perbandingan kuadrat yang terbalik dalam hukum gravitasi Newton. Perbedaannya adalah gaya gravitasi selalu tarik-menarik, sedangkan gaya listrik dapat bersifat tarik-menarik maupun tolak-menolak.

Agar lebih mudah memahami hukum Coulomb, pelajarilah dengan cermat contoh soal di bawah ini!

Contoh Soal

Dua buah muatan titik masing-masing +2 μC dan -5 μC terpisah 10 cm satu sama lain. Tentukanlah gaya tarik-menarik kedua muatan tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $q_1 = +2\ \mu$C
$q_2 = -5\ \mu$C
$r = 10$ cm

Ditanyakan: F = . . . ?

Jawab:

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

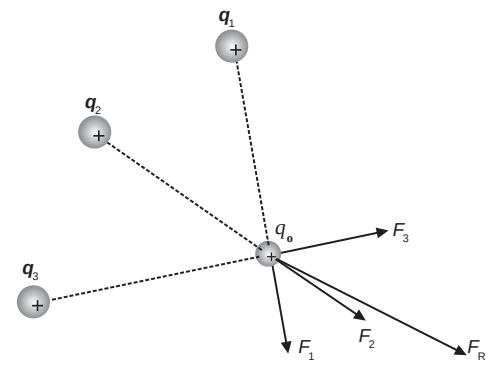
$$F = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot (5 \cdot 10^{-6})}{(10 \cdot 20^{-2})^2}$$

$$F = \frac{0,09}{1 \cdot 10^{-3}}$$

$$F = 90 \text{ N}$$

C. Medan Listrik Statis

Sesuai dengan hasil kegiatan praktik yang telah kamu lakukan, batang kaca yang telah digosok kain wol jika didekatkan akan tolak-menolak. Namun timbul pertanyaan, mengapa ketika jarak antarbatang kaca diperbesar, gaya tolak antarbatang kaca melemah bahkan menghilang? Ternyata terdapat suatu wilayah di sekitar batang kaca tersebut yang masih dapat terpengaruh oleh gaya listrik. Tempat di sekitar muatan listrik yang masih dipengaruhi gaya listrik itu merupakan medan listrik.



Gambar 4.7 Muatan uji q_o dalam medan listrik q_1, q_2, dan q_3

Suatu muatan selalu menghasilkan gaya ke segala arah dalam ruangan. Gambar 4.7 menunjukkan sejumlah muatan q_1, q_2, dan q_3 yang terletak sembarang pada suatu ruang. Muatan q_o diletakkan pada suatu titik di sekitar sistem muatan tersebut. Muatan q_o merupakan muatan uji yang cukup kecil sehingga tidak mengganggu distribusi awal. Interaksi antara muatan q_o dan sistem muatan menghasilkan gaya F. Gaya total yang dialami muatan q_o merupakan resultan vektor dari masing-masing gaya yang bekerja pada q_o. Ruang yang masih mendapat pengaruh sistem muatan disebut medan listrik.

Medan Listrik

Medan listrik E di suatu titik didefinisikan sebagai gaya total pada suatu muatan uji positif q_o per satuan muatan q_o tersebut.

$$E = \lim_{q_0 \to 0} \frac{F}{q_0} \quad \ldots (4.2)$$

Keterangan:

E : medan listrik (N/C)

Medan listrik merupakan besaran vektor yang menggambarkan keadaan di dalam ruang yang dibentuk oleh sistem muatan. Dengan memindahkan muatan uji q_o, kita akan mendapatkan E pada semua titik di dalam ruang (kecuali pada titik yang diduduki oleh q_o).

Gaya yang dilakukan pada muatan uji q_o di setiap titik adalah sebagai berikut.

$$F = E \cdot q_o \qquad \ldots (4.3)$$

Agar lebih paham dengan medan listrik statis, pelajarilah soal di bawah ini dengan cermat!

Contoh Soal

Suatu muatan uji 5 μC yang diletakkan pada suatu titik mengalami gaya $2 \cdot 10^{-4}$ newton. Berapakah besar medan listrik E pada titik tersebut?

Penyelesaian:

Diketahui: $q_o = 5\ \mu c$

$F = 2 \cdot 10^{-4}$ N

Ditanyakan: $E = \ldots ?$

Jawab:

$$E = \frac{F}{q_o}$$

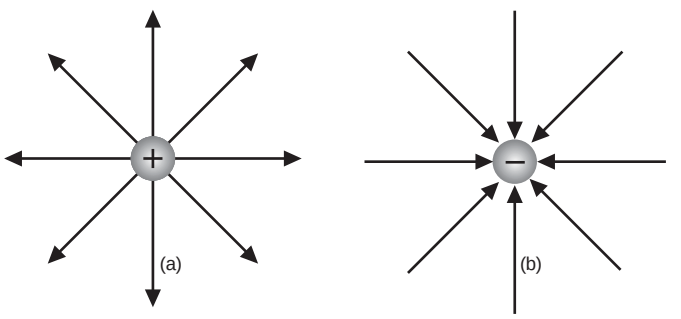
$$E = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-6}}$$

$$E = 40 \text{ N/C}$$

D. Garis-garis Medan Listrik

Medan listrik di sekitar muatan listrik dapat digambarkan dengan garis-garis yang menunjukkan arah medan listrik pada setiap titik. Garis medan listrik disebut juga sebagai garis gaya listrik, karena garis tersebut menunjukkan arah gaya pada suatu muatan.

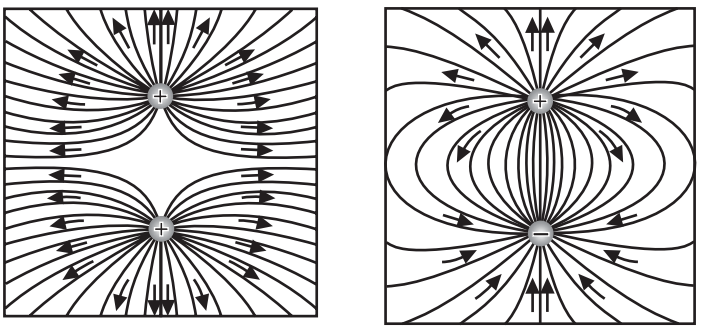
Pada setiap titik di sekitar muatan positif, medan listrik mengarah secara radial menjauhi muatan. Sebaliknya, pada muatan negatif arah medan listrik menuju muatan. Perhatikan lihat gambar 4.8 di bawah ini!



Gambar 4.8 (a) Garis gaya listrik di sekitar muatan positif dan (b) di sekitar muatan negatif

Terdapat hubungan antara kerapatan garis dengan kuat medan listrik. Misalnya sebuah permukaan bola dengan jari-jari r dan berpusat pada suatu muatan. Jumlah garis gaya per satuan luas permukaan bola (kerapatan garis gaya) berbanding terbalik dengan kuadrat jari-jari bola, karena luas permukaan bola adalah $A = 4\pi r^2$. Kuat medan listrik juga berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya. (Ingat $E = \frac{F}{q_o} = \frac{k \cdot q}{r^2}$).

Dengan demikian dapat kita simpulkan bahwa semakin rapat garis-garis gaya berarti kuat medannya semakin besar. Ilustrasi mengenai garis gaya listrik ditunjukkan pada gambar 4.9.

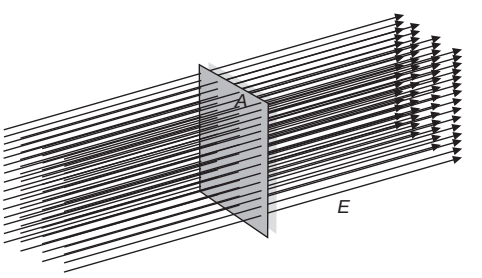


Gambar 4.9 (a) Garis gaya listrik yang diakibatkan dua muatan positif dan (b) garis gaya listrik yang diakibatkan muatan positif dan negatif

E. Hukum Gauss

Pada bagian sebelumnya telah kita bahas tinjauan kualitatif dari medan listrik dengan menggunakan garis gaya. Bagian ini akan membahas medan listrik dengan menggunakan tinjauan matematis.

Perhatikan gambar 4.10 di samping! Kita tinjau luasan A yang ditembus oleh garis gaya listrik. Jika kita anggap jumlah garis yang masuk sebagai negatif dan jumlah garis yang keluar adalah positif maka jumlah total garis yang keluar dan yang masuk adalah nol.



Gambar 4.10 Garis gaya listrik yang menembus suatu luasan A

Jumlah garis gaya yang menembus luasan ini disebut fluks listrik dan disimbolkan sebagai Φ. Fluks listrik yang tegak lurus melewati luasan A adalah:

$$\Phi = E \cdot A \qquad \ldots (4.4)$$

Keterangan:

Φ : fluks listrik (Nm^2/C)

Jika luasan A tidak tegak lurus terhadap E (lihat gambar 4.10) maka fluks listrik dinyatakan dalam rumus berikut.

$$\Phi = EA \cdot \cos\theta = E_n \qquad \ldots (4.5)$$

Keterangan:

θ : sudut antara normal permukaan dengan E

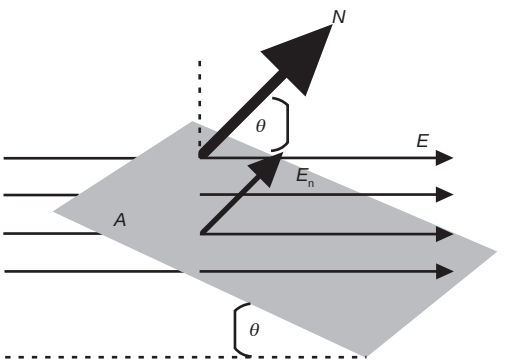
E_n : komponen E yang tegak lurus permukaan A

Kita dapat menerapkan persamaan 4.5 terhadap permukaan lengkung. Dengan meninjau permukaan tersebut sebagai elemen-elemen yang sangat kecil yaitu ΔA_n dan fluks listrik sebagai $\Delta \Phi_n$. Secara umum persamaan ini dapat ditulis sebagai:

$$\Delta \Phi_n = E \cdot \Delta A_n \quad \ldots (4.6)$$

Fluks total yang melewati permukaan ini adalah jumlah dari elemen-elemen $\Delta \Phi_n$ yang dirumuskan sebagai:

$$\Phi_n = \int E \cdot dA \quad \ldots (4.7)$$



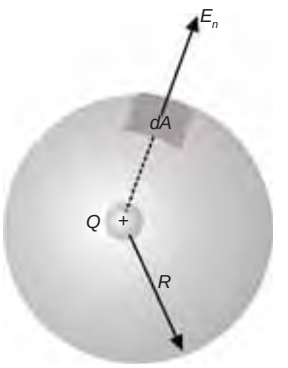
Gambar 4.11 Garis gaya listrik yang tidak tegak lurus menembus permukaan A

Pada permukaan tertutup misal bola (lihat gambar 4.11) fluks total yang melewati permukaan tertutup tersebut dinyatakan sebagai:

$$\Phi_{net} = \Phi E_n \cdot dA \quad \ldots (4.8)$$

Medan listrik di sembarang tempat pada permukaan ini tegak lurus permukaan tersebut. Besarnya medan listrik adalah:

$$E_n = k \frac{Q}{R^2} \quad \ldots (4.9)$$



Gambar 4.12 Fluks listrik pada permukaan bola

Dari persamaan 4.8 dan 4.9 dapat dihitung besarnya fluks listrik pada permukaan bola, yaitu:

$$\Phi_{net} = 4\pi kQ \quad \ldots (4.10)$$

Dapat disimpulkan bahwa pada permukaan tertutup, fluks total yang menembus permukaan ini adalah $4\pi k$ kali muatan total di dalam permukaan tersebut. Pernyataan ini disebut sebagai hukum Gauss.

Hukum Gauss

Besaran k dinyatakan sebagai:

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \quad \ldots (4.11)$$

Keterangan:

ε_0 : permisivitas ruang hampa = $8{,}854 \cdot 10^{-12}$ C^2/Nm^2

Jadi persamaan 4.9 dapat juga ditulis sebagai:

$$E_n = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \quad \ldots (4.12)$$

Contoh Soal

Tentukan kuat medan di dalam dan di luar selimut bola dengan jari-jari R dan bermuatan Q!

Penyelesaian:

Diketahui: bola dengan jari-jari R dan muatan Q

Ditanyakan: E_{dalam} = . . . ?

E_{luar} = . . . ?

Jawab:

Di dalam selimut bola, jari-jari $r < R$ dan tidak ada muatan yang melingkupi ($Q = 0$).

Dari persamaan 4.12 diperoleh:

$$E_n = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

$$E_n = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \cdot \frac{0}{r^2}$$

$$E_n = 0$$

Di luar selimut bola, jari-jari $r > R$, memiliki rapat muatan luas yang besarnya adalah:

$$\sigma = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{4\pi R^2}$$

Dari persamaan 4.12 diperoleh:

$$E_n = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \cdot \frac{Q}{r^2}$$

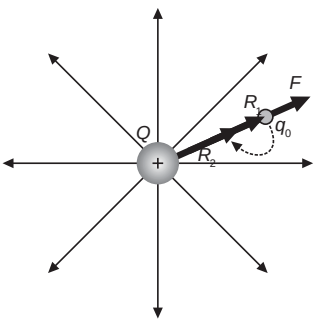
F. Potensial Listrik

Ketika gaya konservatif F bekerja pada muatan listrik yang mengalami perpindahan maka kerja yang dilakukan oleh gaya konservatif mengurangi energi potensial. Perubahan energi potensial sebanding dengan muatan uji. Perubahan energi potensial per satuan muatan itulah yang menunjukkan beda potensial.

Coba perhatikan gambar 4.13! Sebuah muatan positif Q menghasilkan medan listrik homogen E di sekitar muatan. Sebuah muatan uji q_o positif pada kedudukan R_1 akan kita pindahkan hingga ke kedudukan R_2.

Untuk memindahkan muatan ini diperlukan usaha sebesar:

$$W_{12} = \int -F \, . \, dr \qquad \ldots (4.13)$$



Gambar 4.13 Pemindahan muatan uji q_o dari kedudukan R_1 ke kedudukan R_2

Dengan $F = E \cdot q_o$ dan $E = k \dfrac{Q}{r^2}$

Sehingga persamaan 4.14 dapat ditulis sebagai berikut.

$$W_{12} = \int -\frac{k \cdot Q \cdot q_o}{r^2}$$

$$W_{12} = k \cdot Q \cdot q_o \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \quad \ldots (4.14)$$

Keterangan:

W_{12} : usaha untuk memindahkan muatan dari R_1 ke R_2 (J)

R_1 : kedudukan awal

R_2 : kedudukan akhir

Perlu diketahui, bahwa medan listrik termasuk medan konservatif. Oleh karena itu, besarnya usaha yang dilakukan untuk memindahkan muatan dalam medan listrik tidak bergantung pada lintasannya, tetapi hanya bergantung pada kedudukan awal dan kedudukan akhir.

Jika kedudukan R_1 sangat jauh ($\approx\infty$) maka persamaan 4.14 menjadi:

$$W_{12} = k \cdot Q \cdot q_o \left(\frac{1}{R_2} \right) \quad \ldots (4.15)$$

Besaran inilah yang disebut sebagai energi potensial listrik. Energi potensial listrik adalah energi yang diperlukan untuk memindahkan muatan dalam medan listrik dari suatu titik yang jaraknya tak terhingga ke suatu titik tertentu. Energi potensial listrik dirumuskan sebagai:

$$E_p = \frac{k \cdot Q \cdot q_o}{R^2} \quad \ldots (4.16)$$

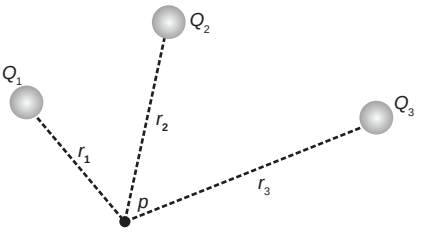
Potensial listrik di suatu titik didefinisikan sebagai energi potensial per satuan muatan positif di titik tersebut. Potensial listrik di suatu titik dinyatakan sebagai:

$$V = \frac{E_p}{q_0} = \frac{k \cdot Q}{R} \quad \ldots (4.17)$$

Satuan untuk potensial listrik adalah volt (V) atau joule/coulomb (J/C).

Potensial listrik pada suatu titik oleh beberapa muatan dinyatakan sebagai jumlah potensial listrik oleh masing-masing muatan di titik tersebut. Perhatikan gambar 4.14!

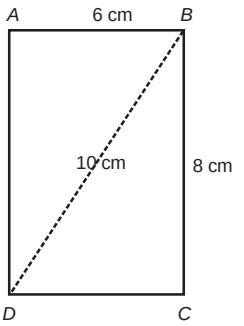
$$V = \Sigma k \frac{Q_n}{r_n} \quad \ldots (4.18)$$



Gambar 4.14 Potensial listrik oleh beberapa muatan

Contoh Soal

Persegi panjang *ABCD* dengan *AB* = 6 cm dan *BC* = 8 cm, terdapat muatan pada titik-titik *A*, *B*, dan *C* masing-masing +4 μC, -5 μC, dan +3 μC. Tentukanlah potensial listrik di titik *D*!



Penyelesaian:

Diketahui: $q_A = +4\ \mu C$

$q_B = -5\ \mu C$

$q_C = +3\ \mu C$

Ditanyakan: $V_D = \ldots ?$

Jawab:

Dengan persamaan 4.18 dapat dihitung potensial di *D*:

$$V_D = \Sigma k \cdot \frac{Q}{r}$$

$$V_D = k \cdot \left(\frac{q_A}{r_{AD}} + \frac{q_B}{r_{BD}} + \frac{q_C}{r_{CD}} \right)$$

$$V_D = 9 \cdot 10^9 \left(\frac{4 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 10^{-2}} + \frac{-5 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-2}} + \frac{3 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 10^{-2}} \right)$$

$$V_D = 9 \cdot 10^9 \ (4 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5} + 5 \cdot 10^{-5})$$

$$V_D = 9 \cdot 10^9 \cdot 5 \cdot 10^{-5}$$

$$V_D = 45 \cdot 10^4 \text{ Volt}$$

$$V_D = 4{,}5 \cdot 10^5 \text{ Volt}$$

G. Kapasitor

Kapasitor merupakan salah satu komponen elektronika yang sering digunakan. Kapasitor digunakan dalam rangkaian elektronika yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik, filter, dan memblokir arus DC. Kapasitor terdiri atas dua keping konduktor yang dipisahkan oleh isolator yang disebut dielektrik. Masing-masing keping konduktor diberi muatan yang berbeda tetapi memiliki kerapatan yang sama.

Kapasitansi

Setiap kapasitor memiliki kapasitansi yang didefinisikan sebagai besarnya perbandingan muatan yang tersimpan dalam kapasitor dengan beda potensial antara kedua keping.

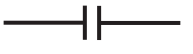
$$C = \frac{Q}{V} \qquad \ldots (4.19)$$

Keterangan:

C : kapasitansi (Farad)

Q : muatan yang tersimpan dalam kapasitor (C)

V : beda potensial antara dua keping (V)



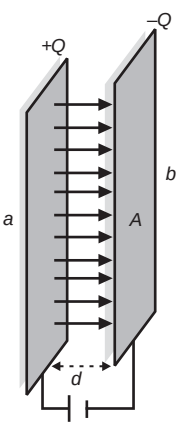
Gambar 4.15 Simbol kapasitor

Satuan untuk kapasitansi adalah coulomb per volt (C/V) disebut juga farad (F).

1. Kapasitor Keping Sejajar

Kapasitor yang biasa digunakan adalah kapasitor keping sejajar yang menggunakan dua keping konduktor sejajar. Dalam kenyataannya, keping ini dapat berupa lapisan-lapisan logam yang tipis, yang terpisah dan terisolasi satu sama lain.

Untuk mempelajari kapasitansi kapasitor keping sejajar, perhatikan gambar 4.16! Kita misalkan dua buah keping plat *a* dan *b* luasnya *A* dan terpisah dengan jarak *d* sedemikian sehingga cukup dekat. Masing-masing keping kita beri muatan +*Q* dan –*Q*.



Gambar 4.16 Kapasitor keping sejajar

Dengan menggunakan persamaan 4.12, masing-masing keping memiliki medan listrik $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \cdot \frac{Q}{r_2}$. Bilangan $4\pi r^2$ sama dengan dua kali luas keping ($2A$), sehingga $E = \frac{\sigma}{2A\varepsilon_o} = \frac{\sigma}{2\varepsilon_o}$.

Dengan demikian medan listrik total antara dua keping adalah:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_o} \qquad \ldots (4.20)$$

Keterangan:

σ : kerapatan muatan atau muatan per satuan luas permukaan (C/m^2) = $\frac{Q}{A}$

Beda potensial antara *a* dan *b* adalah:

$$V_{ab} = E \cdot d = \frac{\sigma}{\varepsilon_o} \cdot d$$

$$V_{ab} = \frac{Q \cdot d}{A \cdot \varepsilon_o} \qquad \ldots (4.21)$$

Dengan demikian, persamaan 4.19 dapat kita tuliskan sebagai:

$$C = \varepsilon_o \frac{A}{d} \qquad \ldots (4.22)$$

Keterangan:

ε_o : permisivitas ruang hampa = 8,85 · 10^{-12} F/m

Contoh Soal

Tentukan kapasitansi sebuah kapasitor keping sejajar berbentuk bujur sangkar dengan sisi 10 cm dan jarak antarkepingnya 1mm!

Penyelesaian:

Diketahui: s = 10 cm

d = 1 mm

Ditanyakan: C = . . . ?

Jawab:

Dengan menggunakan persamaan 4.22, kapasitansinya adalah:

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

$$C = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{10^{-2}}{10^{-3}}$$

$$C = 8{,}85 \cdot 10^{-11} \text{ F}$$

$$C = 8{,}85 \text{ pF}$$

2. Dielektrik

Dielektrik adalah bahan isolator yang digunakan sebagai penyekat dalam kapasitor. Fungsi bahan ini adalah untuk meningkatkan kapasitansi sebuah kapasitor. Setiap bahan dielektrik memiliki karakteristik tersendiri yang disebut konstanta dielektrik (K). Besarnya konstanta dielektrik dinyatakan sebagai berikut.

$$K = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \qquad \text{. . . (4.23)}$$

Keterangan:

ε : permisivitas dielektrik

Setelah diberi bahan dielektrik, kapasitansi kapasitor menjadi:

$$C = K \cdot C_o \qquad \text{. . . (4.25)}$$

Keterangan:

C_o : kapasitansi ketika belum diberi bahan dielektrik

Tabel 5.1 Konstanta dielektrik beberapa material

No	Bahan	Suhu (°C)	*K*
1	Ruang hampa (vakum)	-	1
2.	Gelas	25	5–10
3.	Mika	25	4–6
4.	Teflon	22	2,1
5.	Air	25	78,54
6.	Gliserin	25	42,5
7.	Amonia cair	-77,7	25

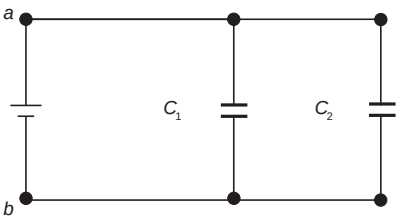
3. Rangkaian kapasitor

Dua buah kapasitor atau lebih sering digunakan bersama-sama secara kombinasi. Dua buah kapasitor atau lebih dapat dirangkai dengan beberapa cara, yaitu paralel, seri atau kombinasi paralel seri.

a. Rangkaian paralel

Agar diperoleh kapasitansi kapasitor yang lebih besar maka beberapa kapasitor dapat disusun paralel.

Gambar 4.16 menunjukkan dua buah kapasitor yang dirangkai paralel. Hasil dari rangkaian ini adalah kapasitansinya meningkat. Artinya pada beda potensial yang sama, muatan yang disimpan lebih banyak.



Gambar 4.17 Rangkaian kapasitor paralel

Jika kapasitansi kapasitor masing-masing C_1 dan C_2, maka muatan yang tersimpan dalam Q_1 dan Q_2 dapat dinyatakan sebagai:

$$Q_1 = C_1 \cdot V$$
$$Q_2 = C_2 \cdot V$$

Muatan total yang tersimpan adalah:

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2 \quad \ldots (4.25)$$

Kapasitansi ekivalen adalah kapasitansi kapasitor tunggal yang mampu menggantikan sejumlah rangkaian kapasitor dan menyimpan jumlah energi yang sama untuk beda potensial yang diberikan. Kapasitansi ekivalen rangkaian ini adalah:

$$C_{eq} = \frac{Q}{V} = C_1 + C_2 \quad \ldots (4.26)$$

Dengan penalaran yang sama dapat kita tentukan untuk sebanyak n kapasitor yang dirangkai paralel, yaitu:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots + C_n \quad \ldots (4.27)$$

Untuk mengetahui sifat rangkaian paralel kapasitor, kita dapat melakukan percobaan berikut.

Praktikum 2

Rangkaian Kapasitor Paralel

A. Tujuan

Mempelajari besar kapasitas dan beda potensial pada kapasitor yang disusun paralel.

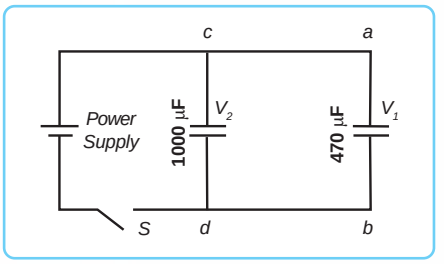
B. Alat dan Bahan:

1. *Basicmeter* 1 buah
2. Papan rangkaian 1 buah
3. Kabel penghubung merah 2 buah
4. Kabel penghubung hitam 2 buah
5. *Power supply* (catu daya) 1 buah
6. Jembatan penghubung 3 buah

7. Saklar kutub 1 buah
8. Kapasitor 470 μF 1 buah
9. Kapasitor 1000 μF 1 buah

C. **Langkah Kerja**

1. Rangkailah peralatan/komponen seperti skema berikut!



2. Periksalah bahwa rangkaian dalam keadaan:
   a. Saklar *S* dalam keadaan terbuka (posisi 0).
   b. *Basicmeter* diset pada fungsi voltmeter dengan batas ukur 10 volt DC.
   c. Keluaran catu daya 4 volt DC.
3. Hidupkan catu daya, kemudian tutup saklar *S* (posisi 1)!
4. Ukur beda potensial antara titk a dan b (V_1)!
5. Ukur beda potensial antara titk c dan d (V_2)!
6. Ulangi langkah di atas dengan sumber tegangan 6 volt!
7. Isikan hasil pengamatanmu pada tabel berikut!

Sumber Tegangan	V_1	V_2	V_{tot}	$Q_1 = C_1V_1$	$Q_2 = C_2V_2$	$Q_{tot} = Q_1+Q_2$	$C_{tot} = \frac{Q_{tot}}{V_{tot}}$	C_1+C_2
4 volt								
6 volt								

8. Berdasarkan hasil pengamatan, lakukan hal-hal berikut!
   a. Diskusikan dengan kelompokmu tentang $Q_{tot} = Q_1 + Q_2$ dan $C_{tot} = \frac{Q_{tot}}{V_{tot}}$
   b. Tuliskan hubungan antara:
      1) kapasitas gabungan dengan kapasitas masing-masing kapasitor,
      2) tegangan gabungan dengan tegangan masing-masing kapasitor,
      3) muatan gabungan dengan muatan masing-masing kapasitor.
9. Berikan kesimpulan dan komentar berdasarkan hasil pengamatan!
10. Diskusikan kesimpulan hasil pengamatanmu dengan kelompok lain melalui diskusi kelas!

Peringatan:

a. Berhati-hatilah dalam menggunakan alat percobaan yang berhubungan dengan listrik!
b. Setelah selesai, kembalikan alat-alat percobaan pada tempat semula!

b. Rangkaian seri

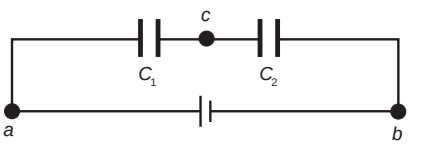
Untuk memperoleh kapasitansi kapasitor yang lebih kecil maka beberapa kapasitor dapat disusun secara seri.

Pada rangkaian seri, beda potensial ujung C_1 tidak sama dengan ujung C_2.

Dalam hal ini berlaku:

$$V_1 = V_a - V_c = \frac{Q}{C_1} \quad \ldots (4.28)$$

$$V_2 = V_c - V_b = \frac{Q}{C_2} \quad \ldots (4.29)$$



Gambar 4.18 Rangkaian kapasitor secara seri

Di mana,

$$Q = Q_1 = Q_2$$

Beda potensial pada ujung-ujung rangkaian adalah:

$$V = V_a - V_b = (V_a - V_c) + (V_c - V_b)$$
$$V = V_1 + V_2$$
$$V = Q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right) \quad \ldots (4.30)$$

Besarnya kapasitansi ekivalen rangkaian seri dapat ditentukan dengan rumus sebagai berikut.

$$C_{eq} = \frac{Q}{V} \quad \ldots (4.31)$$

Dari persamaan 4.29 dan 4.30 kita dapatkan:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \ldots (4.32)$$

Dengan cara yang sama, kita dapat menentukan kapasitansi ekivalen untuk rangkaian *n* kapasitor, yaitu:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \ldots + \frac{1}{C_n} \quad \ldots (4.33)$$

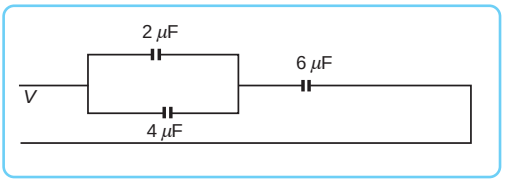
c. Rangkaian kombinasi

Pada rangkaian kombinasi, kapasitor-kapasitor dapat disusun seri, atau paralel, untuk kemudian dirangkai ulang secara seri atau paralel dengan kapasitor lain. Pada rangkaian kombinasi, prinsip pada rangkaian seri dan paralel tetap berlaku. Oleh karena itu, pada rangkaian kombinasi, langkah pertama penentuan nilai kapasitansi kapasitor pengganti adalah dengan menyederhanakan rangkaian.

Untuk lebih memahami rangkaian kombinasi kapasitor, pelajarilah dengan cermat contoh soal berikut ini!

Contoh Soal

Tiga buah kapasitor masing-masing 2 μF, 4 μF, dan 6 μF disusun seperti gambar berikut.



Tentukan C_{eq} rangkaian tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $C_1 = 2\ \mu F$

$C_2 = 4\ \mu F$

$C_3 = 6\ \mu F$

Ditanyakan: $C_{eq} = \ldots ?$

Jawab:

Langkah pertama kita cari dulu C_{eq1} untuk rangkaian paralel.

$C_{eq1} = C_1 + C_2$

$C_{eq1} = 2\ \mu F + 4\ \mu F = 6\ \mu F$

Kemudian rangkaian ini kita seri dengan kapasitor ketiga,

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{6\ \mu F} + \frac{1}{6\ \mu F}$$

Jadi $C_{eq} = 3\ \mu F$

4. Energi yang Tersimpan dalam Kapasitor

Salah satu fungsi dari kapasitor adalah sebagai penyimpan muatan listrik. Semakin banyak muatan listrik yang tersimpan, semakin besar energi elektrostatik yang dimiliki kapasitor. Energi elektrostatik yang tersimpan dalam kapasitor akan kita pelajari pada uraian berikut ini.

Jika sejumlah kecil muatan q dipindahkan melalui beda potensial V maka energi potensial muatan naik sebesar qV. Dengan demikian, untuk memberi muatan suatu kapasitor diperlukan kerja. Pada awal proses pemuatan tidak ada konduktor yang termuati dan kedua konduktor memiliki potensial yang sama. Setelah proses pemuatan, sejumlah muatan Q telah dipindahkan dari satu konduktor ke konduktor yang lain dan beda potensialnya menjadi $V = \frac{Q}{C}$.

Kita misalkan q adalah muatan yang dipindahkan pada suatu waktu selama proses. Beda potensial adalah $V = \frac{q}{C}$. Jika sejumlah

kecil muatan tambahan *dq* dipindahkan dari konduktor negatif dengan potensial 0 ke konduktor positif dengan potensial *V* maka perbedaan energi potensial dari muatan naik sebesar:

$$du = \frac{q}{C}\, dq \qquad \ldots (4.34)$$

Kenaikan total energi potensial *U* adalah:

$$U = \int_0^Q \frac{q}{C}\, dq \qquad \ldots (4.35)$$

Energi potensial ini adalah energi yang tersimpan dalam suatu kapasitor. Karena $C = \frac{Q}{C}$ maka energi yang tersimpan dapat dinyatakan sebagai:

$$U = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_2}{C} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q}{V} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \qquad \ldots (4.36)$$

Sebaiknya Tahu

Fotokopi

Rep. www.alvaradopublicliibrary.org

Gambar 4.19 Mesin fotokopi

Tahukah kamu bahwa mesin fotokopi memanfaatkan sifat elektrostatis? Dokumen asli yang akan difotokopi diletakkan terbalik di atas kaca. Cahaya lampu yang cukup kuat menghasilkan muatan negatif pada pelat silinder yang menyebabkan area kertas kopian menjadi bermuatan. Bubuk tinta bermuatan positif akan menempel pada area ini sehingga dihasilkan kopian dokumen yang diinginkan.

Kerja Mandiri

Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!

1. Sebuah kapasitor keping sejajar memiliki jarak antarkeping *d*. Jika $\frac{1}{4}$ bagian dari ruang antarkeping diisi dengan bahan dielektrik yang memilki konstanta dielektrik ε_r, tentukan kapasitasnya!
2. Sebuah kapasitor dengan kapasitansi 100 μF dihubungkan dengan sumber tegangan 6 volt hingga terisi penuh muatan. Kemudian kapasitor tersebut dilepas dari sumber tegangan dan dihubungkan paralel dengan kapasitor 50 μF. Pada keadaan setimbang, berapakah muatan yang tersimpan pada masing-masing kapasitor?

Rangkuman

1. Muatan yang sejenis akan tolak-menolak, muatan yang tidak sejenis akan tarik-menarik.
2. Hukum Coulomb menyatakan bahwa gaya tarik atau tolak antara dua muatan berbanding terbalik dengan besar muatan dan berbanding lurus dengan kuadrat jarak kedua muatan.

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

3. Medan listrik E di suatu titik didefinisikan sebagai gaya total pada suatu muatan uji positif q_o per satuan muatan q_o.

$$E = \frac{F}{q_0}$$

4. Besar kecilnya medan listrik di suatu tempat sebanding dengan kerapatan garis-garis medan listrik di tempat tersebut.

5. Hukum Gauss menyatakan bahwa pada permukaan tertutup, fluks total yang menembus permukaan adalah $4\pi k$ kali muatan total di dalam permukaan tersebut.

$$\Phi_{net} = 4\pi kQ$$

6. Potensial listrik di suatu titik didefinisikan sebagai energi potensial per satuan muatan positif di titik tersebut.

$$V = \frac{E_p}{q_0} = \frac{k \cdot Q}{R}$$

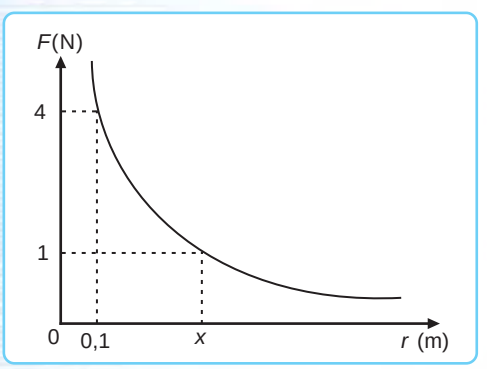
7. Kapasitansi suatu kapasitor keping sejajar dipengaruhi oleh luas penampang keping, jarak antarkeping, dan permisivitas bahan dielektrik.

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

Soal-soal Uji Kompetensi

A. *Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!*

1. Grafik berikut menunjukkan hubungan besarnya gaya elektrostatis dengan jarak pada dua muatan yang sama.



Jarak yang ditunjukkan pada x adalah . . . .

a. 0,12 m
b. 0,15 m
c. 0,20 m
d. 0,40 m
e. 0,50 m

2. Dua buah muatan masing P dan Q terpisah pada jarak 60 cm. Pada P dan Q masing-masing terdapat muatan +10 μC dan -10 μC. Besar dan arah medan listrik pada titik tengah garis penghubung kedua titik tersebut adalah . . . .

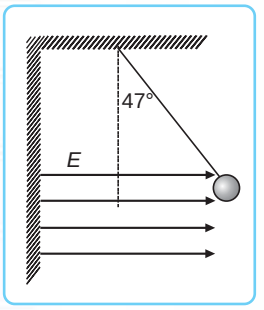
a. 0
b. 10^6 N/C ke arah P
c. 10^6 N/C ke arah Q
d. $2 \cdot 10^6$ N/C ke arah P
e. $2 \cdot 10^6$ N/C ke arah Q

3. Kuat medan listrik di antara dua keping sejajar adalah 10^4 N/C. Luas masing-masing keping adalah 0,1 m^2. Jika jarak kedua keping 4 cm maka muatan pada masing-masing keping adalah . . . .

   a. $8{,}85 \cdot 10^{-9}$ C
   b. $88{,}5 \cdot 10^{-9}$ C
   c. $45{,}4 \cdot 10^{-9}$ C
   d. $17{,}7 \cdot 10^{-9}$ C
   e. $0{,}885 \cdot 10^{-9}$ C

4. Sebuah bola bermuatan dengan massa 1 gram digantungkan pada tali dalam pengaruh medan listrik 10^4 N/C arah mendatar. Jika bola dalam keadaan setimbang sehingga membentuk sudut 47° (cos 47° = 0,6) dan g = 10 m/s^2 maka besarnya muatan pada bola tersebut adalah . . . .

   a. 4 μC
   b. 5 μC
   c. 8 μC
   d. 12,5 μC
   e. 20 μC



5. Usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan sebesar 25 mC sejauh 10 cm dalam medan listrik yang besarnya $4 \cdot 10^4$ N/C adalah . . . .

   a. 100 joule
   b. 10 joule
   c. 1 joule
   d. 0,1 joule
   e. 0,01 joule

6. Sebuah bujur sangkar ABCD dengan sisi 10 cm, pada titik sudutnya terdapat muatan masing-masing 100 μC. Besarnya potensial listrik pada titik perpotongan diagonalnya adalah . . . .

   a. $0{,}9\sqrt{2} \cdot 10^7$ volt
   b. $1{,}8\sqrt{2} \cdot 10^7$ volt
   c. $4{,}6\sqrt{2} \cdot 10^7$ volt
   d. $9 \cdot 10^7$ volt
   e. $46 \cdot 10^7$ volt

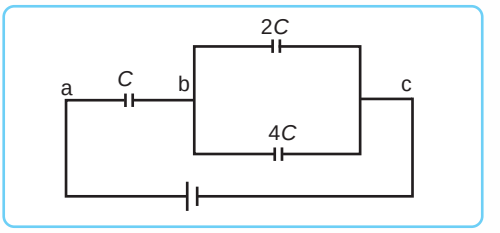
7. Sebuah kapasitor keping sejajar dengan jarak antarkeping 1 mm dan luas keping 20 cm^2 menggunakan bahan dielektrik dengan permitivitas relatif terhadap udara 500. Kapasitor tersebut memiliki kapasitansi sebesar . . . .

   a. 8,85 nF
   b. 17,7 nF
   c. 45,4 nF
   d. 78,8 nF
   e. 156 nF

8. Dua buah kapasitor masing-masing dengan kapasitansi C_1 dan C_2 disusun seri kemudian dihubungkan dengan sumber tegangan V. Jika $C_1 = 2C_2$ maka perbandingan V_1 dengan V_2 adalah . . . .

   a. 1 : 2
   b. 1 : 4
   c. 2 : 1
   d. 4 : 1
   e. 4 : 2

9. Tiga buah kapasitor disusun sebagai berikut:



   Pernyataan berikut berhubungan dengan rangkaian di atas.

   1) kapasitansi ekivalen rangkaian adalah 6 C
   2) $V_{ab} = 5\ V_{bc}$
   3) $C_{bc} = \frac{6}{5}\ C$
   4) Energi yang tersimpan pada ab = 5 kali energi yang tersimpan pada bc

   Pernyataan di atas yang benar adalah . . . . .

   a. 1), 2 dan 4)
   b. 1) dan 4)
   c. 2) dan 4)
   d. 4) saja
   e. 1), 2), dan 4)

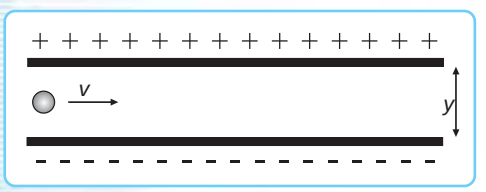
10. Sebuah kapasitor 2.000 μF dengan beda potensial 25 volt pada keadaan penuh dihubungkan dengan sebuah hambatan 10 ohm hingga terjadi arus listrik. Lamanya arus yang mengalir pada rangkaian tersebut adalah . . . .

a. 250 ms
b. 20 ms
c. 2,5 ms
d. 0,25 ms
e. 0,025 ms

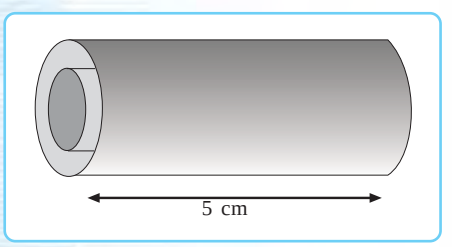
B. *Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!*

1. Suatu muatan negatif q dengan massa m bergerak sepanjang lintasan x dalam pengaruh medan listrik E dengan laju konstan v (lihat gambar). Jika percepatan gravitasi g, tunjukkan bahwa

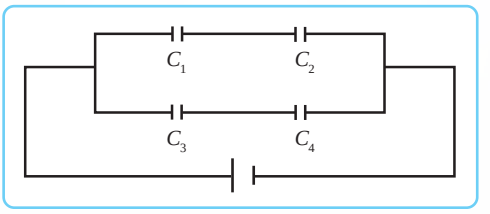
$$y = \frac{1}{2}\left(\frac{qE}{m} - g\right)\left(\frac{x}{v}\right)^2 !$$



2. Sebuah kapasitor berbentuk silinder dengan jari-jari dalam dan luar masing-masing 1 cm dan 2 cm panjangnya 5 cm. Kapasitor menggunakan suatu bahan dielektrik 25 ε_o. Tentukan kapasitansi kapasitor tersebut!



3. Perhatikan rangkaian berikut!



Jika:
$C_1 = C_2 = 200\ \mu F$
$C_3 = C_4 = 400\ \mu F$
$V = 4$ volt

Tentukan:
a. muatan pada C_1 dan C_4,
b. energi yang tersimpan pada rangkaian.

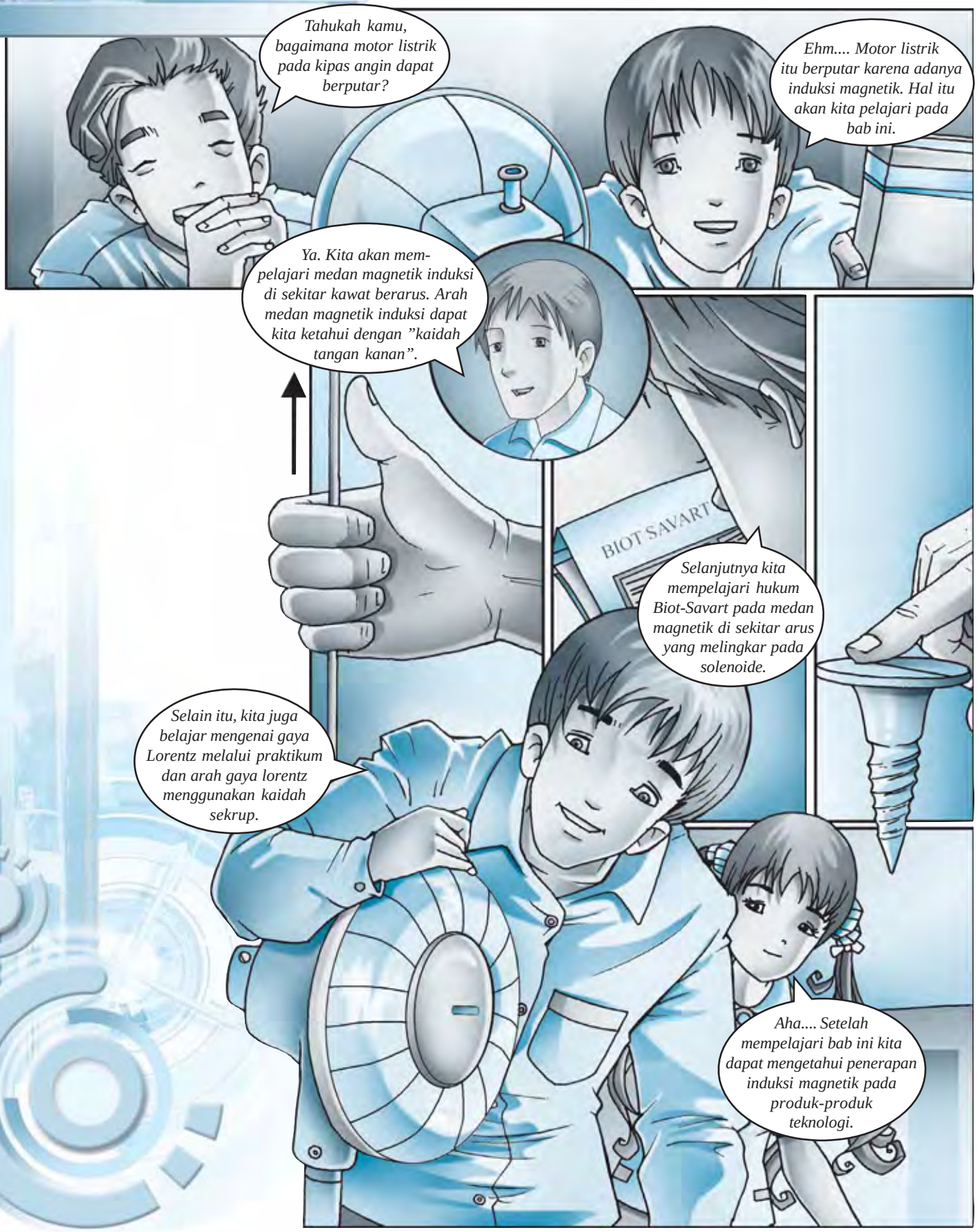
4. Sebuah bola konduktor mempunyai jari-jari 2 cm dan muatannya 3 μC.
Tentukan:
a. kuat medan di dalam bola konduktor,
b. kuat medan di luar bola yang berjarak 4 cm dari permukaan bola.

5. Sebuah bola konduktor mempunyai jari-jari 12 cm dan muatannya 3,6 μC.
Tentukan:
a. rapat muatan luas bola konduktor,
b. gaya yang dialami oleh muatan 0,1 mC yang terletak 3 cm dari permukaan bola.

BAB

5

MEDAN MAGNETIK INDUKSI



Gerbang

Gambar 5.1 Sebuah kereta api berkecepatan tinggi menggunakan rel khusus dengan prinsip induksi magnetik

Pernahkah kamu membayangkan sebuah kereta api yang mampu melaju dengan kecepatan hampir sama dengan kecepatan pesawat terbang? Bagaimana mungkin hal ini dapat terjadi? Kereta *Maglev* adalah kereta api yang mengambang secara magnetik. Kereta ini memanfaatkan gaya angkat magnetik pada relnya sehingga terangkat sedikit ke atas. Gaya dorong yang dihasilkan oleh motor induksi mampu menggerakkan kereta ini dengan kecepatan hingga 650 km/jam. Pada bab ini kita akan mempelajari dasar dari gaya magnetik yang memungkinkan hal di atas terjadi.

Kata Kunci: Medan Magnetik – Kaidah Tangan Kanan – Hukum Biot-Savart – Gaya Lorenz

A. Medan Magnetik Induksi

Pada umumnya, medan magnetik muncul di sekitar magnet. Benda-benda yang memiliki sifat kemagnetan akan terpengaruh oleh medan magnetik itu. Sesuatu yang mengejutkan, bila di sekitar benda yang bukan termasuk magnetik terdapat medan magnetik. Peristiwa keanehan itu pertama kali ditemukan oleh Oersted.

Hans Christian Oersted pada tahun 1820 menemukan bahwa arus listrik dalam sebuah kawat penghantar dapat menghasilkan efek magnetik. Efek magnetik yang ditimbulkan oleh arus tersebut dapat membelokkan arah jarum kompas.

Sebelum mempelajari konsep medan magnetik induksi secara lebih jauh, lakukanlah percobaan berikut!

Praktikum 1

Medan Magnetik Induksi

A. Tujuan

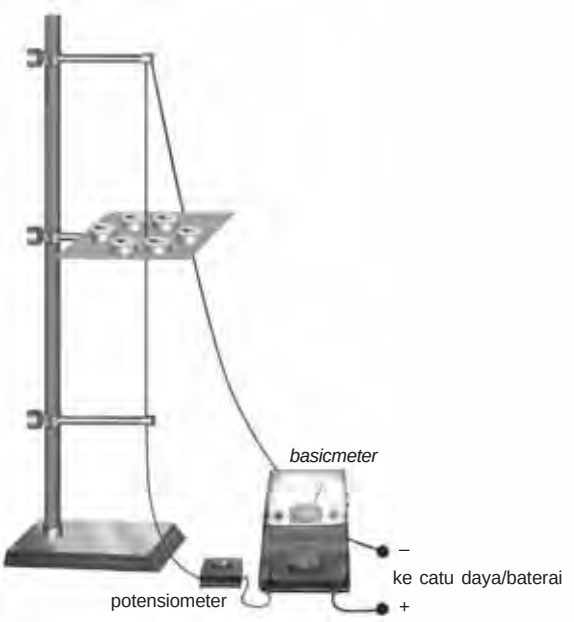
Mengamati adanya medan magnetik di sekitar kawat berarus dan faktor-faktor yang mempengaruhi.

B. Alat dan Bahan

1.	Kawat tembaga/penghantar	secukupnya
2.	Potensiometer 10 kΩ	1 buah
3.	*Basicmeter*	1 buah
4.	Statif	2 buah
5.	Klem penjepit	4 buah
6.	Kompas	6 buah
7.	Kertas karton/tripleks	20 cm × 20 cm
8.	Catu daya/baterai	1 buah

C. Langkah Kerja

1. Susunlah alat dan bahan seperti gambar di bawah ini!



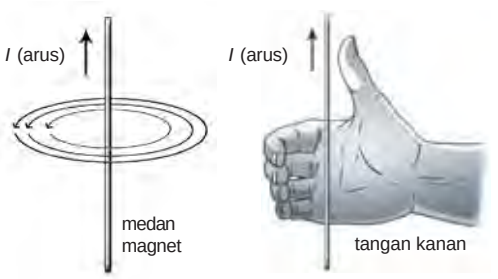
a. Aturlah tegangan keluaran 3 volt DC!
b. Fungsikan *basicmeter* sebagai amperemeter dengan batas ukur 5A!
c. Tempatkan kompas dengan jarak radius ± 2 cm terhadap kawat penghantar!

2. Hidupkanlah catu daya!
3. Amati apa yang terjadi pada kompas!
4. Ubahlah arus dengan memutar potensiometer!
5. Amati apa yang terjadi pada jarum kompas!
6. Dengan arus yang tetap, ubahlah radius kompas!
7. Bandingkan penyimpangan kompas jika jarak kompas dari penghantar diubah-ubah!
8. Diskusikan hasil pengamatanmu dengan anggota kelompokmu!
9. Buatlah kesimpulan dan komentar berdasarkan hasil pengamatanmu!
10. **Ingat**, setelah melakukan praktikum, kembalikan peralatan ke tempat semula dalam keadaan baik!

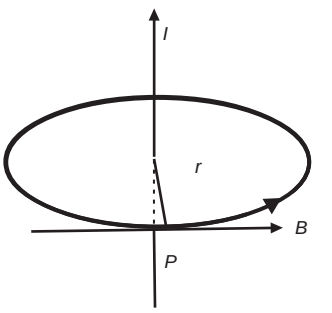
Medan Magnet

Berdasarkan percobaan di atas dapat disimpulkan bahwa penyimpangan jarum kompas ternyata disebabkan oleh medan magnetik yang ditimbulkan saat penghantar dialiri arus listrik. Medan magnetik yang timbul akibat adanya arus listrik inilah yang disebut medan magnetik induksi. Medan magnetik induksi disimbolkan dengan huruf ***B*** dengan satuan weber/m^2 atau Tesla. Medan magnetik merupakan besaran vektor.

Arah medan magnetik induksi dapat ditentukan dengan menggunakan kaidah tangan kanan seperti gambar 5.2 di bawah ini.



Gambar 5.2 Kaidah tangan kanan



Gambar 5.3 Arah medan magnetik induksi di suatu titik di sekitar arus listrik

Kaidah Tangan Kanan

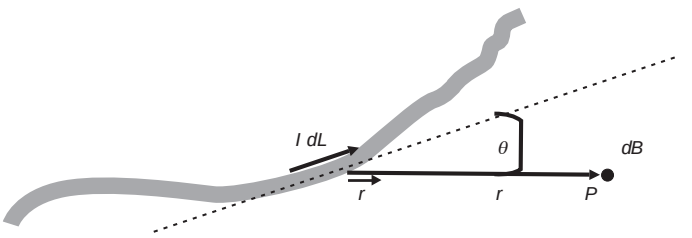
Kaidah tangan kanan menyatakan bahwa, jika kita menggenggam penghantar sehingga ibu jari kita menunjukkan arah arus maka arah genggaman jari yang lain menunjukkan arah medan magnetik induksi di sekitar penghantar. Sedangkan arah medan magnetik di suatu titik searah dengan garis singgung lingkaran di titik tersebut, seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.3.

B. Hukum Biot-Savart

Keberadaan medan magnetik di sekitar kawat berarus telah ditunjukkan oleh Oersted dengan terpengaruhnya magnet di sekitar kawat berarus. Pengaruh tersebut menunjukkan bahwa medan magnetik dapat dihasilkan oleh penghantar berarus. Lalu bagaimanakah cara menentukan medan magnetik di sekitar kawat berarus?

Medan magnetik di suatu titik yang diakibatkan oleh arus listrik pada sebuah rangkaian merupakan resultan medan-medan magnetik yang ditimbulkan oleh semua muatan yang bergerak pada rangkaian itu.

Kita misalkan suatu penghantar sembarang yang dialiri arus *I*.



Gambar 5.4 Besarnya medan magnet di suatu titik di sekitar penghantar

Perhatikan gambar 5.4 di atas! Titik *P* adalah suatu titik di sekitar penghantar yang berjarak *r*. Kita dapat membagi-bagi panjang penghantar tersebut dalam elemen-elemen kecil arus sebesar *I dL* dan besarnya medan magnetik akibat arus pada elemen ini adalah *dB.*

Besarnya medan magnetik di titik *P* dinyatakan sebagai berikut.

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot \frac{I\, dL \sin\theta}{r^2} \qquad \ldots (5.1)$$

Keterangan:

μ_o : permeabilitas udara = $4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A^2

θ : sudut antara *dL* dengan *r*

Persamaan 5.1 di atas dikenal sebagai Hukum Biot-Savart. Dengan menggunakan persamaan 5.1, dapat ditentukan besarnya medan magnetik pada titik *P*, yaitu:

Hukum Biot-Savart

$$B = \frac{\mu_o}{2\pi} \cdot \frac{I}{r} \qquad \ldots (5.2)$$

Keterangan:

B : kuat medan magnetik induksi (wb/m^2)

I : kuat arus (A)

r : jarak titik ke penghantar (m)

Untuk lebih jelasnya, simaklah contoh soal berikut!

Contoh Soal

Tentukanlah besarnya medan magnetik di suatu titik yang berjarak 5 cm dari penghantar yang sangat panjang berarus 2 ampere!

Penyelesaian:

Diketahui: r = 5 cm

I = 2 A

Ditanyakan: B = . . . ?

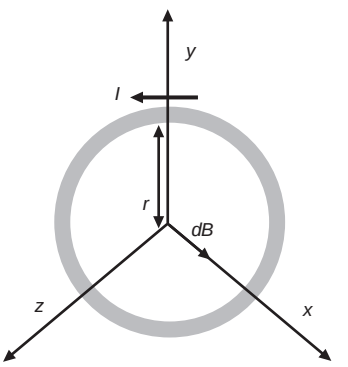
Jawab:

Dengan menggunakan persamaan 5.2, besarnya B adalah:

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot \frac{IdL \sin\theta}{r^2} = 0{,}8 \cdot 10^{-5} \text{ wb/m}^2$$

1. Medan Magnetik di Sekitar Arus yang Melingkar

Untuk menyederhanakan/memudahkan penentuan medan magnetik di tengah kawat melingkar, kita ambil sebuah potongan kecil (elemen dL) dari kawat tersebut. Perhatikan gambar 5.5 di samping! Gambar 5.5 menunjukkan kawat yang melingkar dengan jari-jari r. Arah medan magnetiknya dapat ditentukan dengan menggunakan kaidah tangan kanan, dengan menganggap potongan kawat tersebut sebagai kawat lurus. Dengan demikian, besar medan magnetik tiap elemen adalah:



Gambar 5.5 Medan magnetik di pusat arus yang melingkar

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot \frac{I}{r^2} dL$$

Medan magnetik total pada arus melingkar dapat ditentukan dengan mengintegralkan seluruh elemen pada kawat. Medan magnetik total pada arus melingkar dirumuskan:

$$B = \int dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot \frac{I}{r^2} \int dL$$

Integral dL akan merupakan keliling lingkaran ($2\pi r$) sehingga:

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot \frac{I\, 2\pi r}{r^2} = \frac{\mu_o I}{2r} \quad \text{. . . (5.3)}$$

Untuk lebih memahami rumus di atas, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal

Tentukanlah besarnya medan magnetik di pusat lingkaran berarus 2 ampere, jika jari-jari lingkaran 8 cm!

Penyelesaian:

Diketahui: $I = 2$ A

$r = 8$ cm

Ditanyakan: $B = \ldots ?$

Jawab:

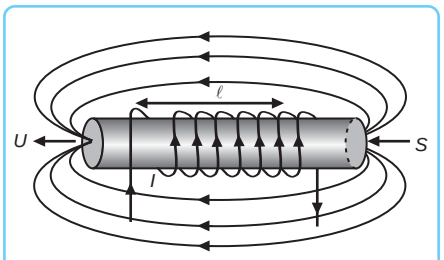
Dengan menggunakan persamaan 5.3, B dapat kita hitung sebesar:

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 0{,}08} \cdot 2 = 5\pi \cdot 10^{-7} \text{ wb/m}^2$$

2. Medan Magnetik pada Solenoide

Solenoide disebut juga kumparan. Solenoide merupakan penghantar panjang yang terdiri atas banyak lilitan. Jika solenoide diberi arus maka akan timbul medan magnetik.

Solenoide yang digulung rapat dapat dianggap sebagai sederetan kawat melingkar beraturan yang ditempatkan berdampingan serta membawa arus yang sama. Solenoide ini menghasilkan medan magnetik seragam di dalamnya. Adapun ujung-ujung solenoide memiliki sifat kemagnetan, dan berfungsi sebagai kutub-kutub magnetik. Penentuan kutub magnetik dari solenoide dapat menggunakan kaidah tangan kanan.



Gambar 5.6 Medan magnetik pada kumparan

Perhatikan gambar 5.6 di samping! Pola medan magnetik pada solenoide mirip dengan medan magnetik pada magnet batang. Jika panjang kumparan adalah L dan jumlah lilitan adalah N maka besarnya medan magnetik pada pusat kumparan dirumuskan sebagai:

$$B_{pusat} = \mu_o \cdot I \frac{N}{\ell} \quad \ldots (5.4)$$

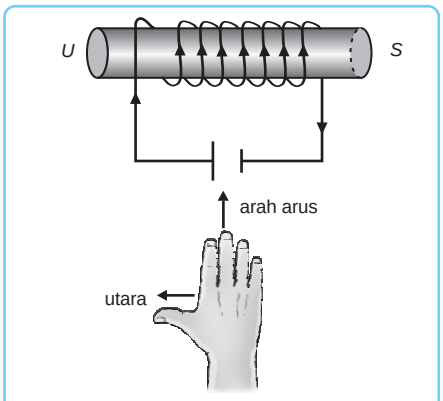
Sedang medan magnetik di ujung-ujung solenoide adalah:

$$B_{pusat} = \frac{1}{2} \mu_o \cdot I \frac{N}{\ell}$$

Keterangan:

N : banyaknya lilitan dalam solenoide

ℓ : panjang solenoide (m)



Gambar 5.7 Kutub magnetik solenoide dapat ditentukan dengan menggunakan tangan kanan

C. Gaya Lorentz

Pernahkah kamu mengamati bagaimana kipas angin atau motor listrik bekerja? Percobaan sederhana berikut ini akan membantumu menjelaskan bagaimana keduanya dapat bekerja.

Praktikum 2

Gaya Lorentz

A. Tujuan

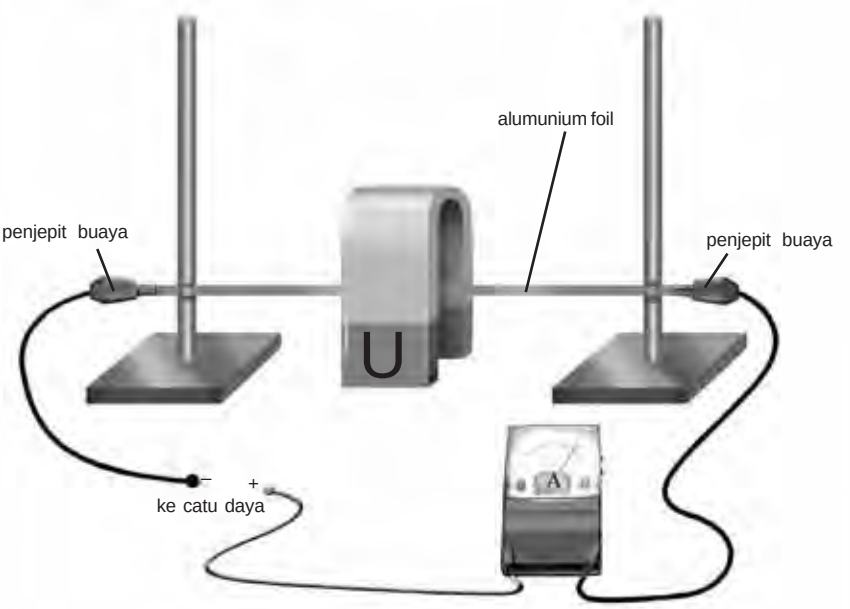
Mengamati gejala gaya Lorentz.

B. Alat dan Bahan

1.	Statif	2 buah
2.	Pita alumunium foil dengan lebar 0,5 cm	± 20 cm
3.	Kabel penghubung merah	2 buah
4.	Kabel penghubung hitam	2 buah
5.	Kabel penghubung merah dengan penjepit buaya	1 buah
6.	Kabel penghubung hitam dengan penjepit buaya	1 buah
7.	Ammeter 0 – 5 A	1 buah
8.	Magnet U	1 buah
9.	Catu daya	1 buah

C. Langkah Kerja

1. Susunlah alat dan bahan seperti gambar berikut!



2. Perhatikan hal-hal berikut!
   a. Aturlah catu daya pada posisi *off* dengan tegangan *output* 3 volt DC!
   b. Usahakan agar tarikan pita terhadap statif jangan terlalu tegang!
   c. Jangan menghidupkan catu daya terlalu lama agar pita alumunium tidak terbakar!
3. Hidupkanlah catu daya sekejap! Amati apa yang terjadi dengan pita alumunium foil!
4. Ulangilah langkah 1 dengan mengubah-ubah arah kutub magnet U! Adakah perubahan arah gerakan pita alumunium?
5. Diskusikan dengan kelompokmu, adakah hubungan antara arah arus, arah kutub magnet dan gerakan pita alumunium! (Informasi: Gerakan yang timbul pada pita alumunium foil saat ada aliran arus listrik disebut gaya magnetik atau gaya Loretz).
6. Buatlah kesimpulan dan komentar berdasarkan hasil pengamatanmu!
7. Setelah selesai melaksanakan praktikum, jangan lupa untuk mengembalikan alat dan bahan ke tempat semula! Jagalah kebersihan lingkungan dan tubuhmu!

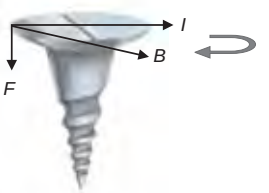
Gaya Lorentz

Gaya magnetik atau gaya lorentz adalah gaya yang timbul pada penghantar berarus atau muatan yang bergerak dalam medan magnetik. Besarnya gaya Lorentz dirumuskan sebagai berikut.

$$F = IBL \sin \theta \quad \ldots (5.5)$$

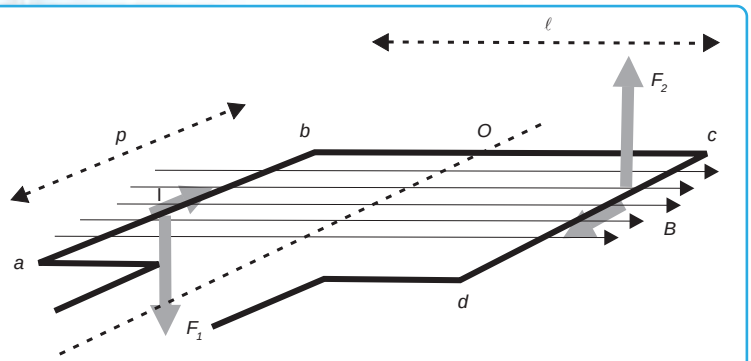
Keterangan:
F = gaya lorentz (N)

Arah gaya Lorentz dapat ditentukan dengan menggunakan kaidah sekrup putar kanan seperti ditunjukkan pada gambar 5.7.



Gambar 5.7 Aturan sekrup putar kanan untuk menentukan arah gaya Lorentz

Coba perhatikan sebuah kumparan berarus yang berada dalam medan magnetik berikut ini!



Gambar 5.8 Gaya Lorentz pada sebuah kumparan

Sebaiknya Tahu

Gambar 5.9 Shinkansen, sebuah kereta api magnetik mampu bergerak dengan kecepatan tinggi tanpa kebisingan

Kereta api ini mampu berjalan dengan kecepatan rata-rata 435 km/jam. Namun demikian, kereta api ini tidak menimbulkan kebisingan. Hal ini karena tidak ada gesekan antara roda kereta dengan relnya. Bagaimana hal ini terjadi?

Ketika kereta berjalan, gaya magnetik pada landasan rel, akan menyebabkan kereta melayang di atas rel. Gaya yang sama juga bekerja ke arah kiri dan kanan sehingga kereta dapat stabil. Bayangkan, kereta ini seperti terbang.

Sebuah kumparan *abcd* dengan panjang *p* dan lebar ℓ dalam medan magnetik *B* dialiri arus searah anak panah. Pada sisi *ab* akan timbul gaya Lorentz F_1 ke bawah dan pada sisi *cd* akan timbul gaya Lorentz F_2 dengan arah ke atas. Kedua gaya ini menyebabkan momen gaya terhadap *O*. Akibat momen gaya inilah maka kumparan akan menyimpang terhadap keadaan mendatar sehingga dapat berputar.

Besarnya momen gaya yang timbul pada kumparan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\tau &= \tau_1 + \tau_2 \\ &= F_1 \cdot \frac{1}{2}\ell + F_2 \cdot \frac{1}{2}\ell \\ &= IBp\ell \\ &= IBA\end{aligned} \qquad \ldots (5.6)$$

Jika kumparan terdiri atas *N* lilitan maka besarnya momen gaya pada kumparan tersebut adalah:

$$\tau = N \cdot I \cdot B \cdot A \qquad \ldots (5.7)$$

Keterangan:

A = Luas penampang kumparan (m^2)

Prinsip yang sama juga berlaku pada motor listrik, kipas angin, dan sebagainya.

Gambar 5.10 Kipas angin bekerja menurut prinsip gaya Lorentz

Untuk memperjelas pemahamanmu tentang uraian di atas, perhatikan contoh soal berikut! Selanjutnya, kerjakan soal di bawahnya!

Contoh Soal

Sebuah motor listrik menggunakan kumparan berbentuk lingkaran dengan jari-jari 5 cm yang terdiri atas 100 lilitan. Medan magnet yang melingkupi kumparan adalah 0,05 wb/m^2. Jika kumparan dialiri arus 10 mA, tentukanlah besarnya momen gaya yang menggerakkan motor listrik tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: r = 5 cm

N = 100

I = 10 mA

Ditanyakan: B = . . . ?

Jawab:

Luas kumparan $A = \pi \cdot r^2$

$= 3{,}14 \cdot (5.10^{-2})^2$

$= 7{,}85 \cdot 10^{-3}$

Dengan menggunakan persamaan 6.6 besarnya momen gaya pada kumparan adalah:

$\tau = 100.10^{-2} \cdot 0{,}05 \cdot 7{,}85 \cdot 10^{-3}$

$= 3{,}925 \cdot 10^{-4}$ Nm

Kerja Mandiri

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

1. Tentukanlah kuat medan magnetik induksi pada jarak 2 cm di sekitar penghantar lurus yang dialiri arus listrik sebesar 0,5 ampere!
2. Tentukanlah fluks magnetik yang menembus kumparan yang terdiri atas 100 lilitan dengan jari-jari penampang 5 cm! Arus yang melalui kumparan sebesar 2 ampere.
3. Mengapa kumparan pada motor listrik dibuat sedemikian rupa sehingga arah penampang kumparan tidak hanya pada satu arah saja?

Setelahlah kamu memahami perhitungan teoritis mengenai motor listrik, mantapkan pemahamanmu dengan melakukan kegiatan praktik berikut ini!

Praktikum 3

Membuat Motor Listrik

A. Tujuan

Menerapkan prinsip induksi magnetik dan gaya magnetik dalam teknologi berupa motor listrik.

B. Alat dan Bahan

1.	Batu baterai	2 buah
2.	Kawat tembaga	secukupnya
3.	2 magnet batang	2 buah
4.	Penyangga kumparan dari logam	1 pasang
5.	Perekat untuk menyatukan baterai dan penyangga kumparan	secukupnya

C. Langkah Kerja

1. Buatlah kumparan kawat tembaga dengan berbagai bentuk yang paling kamu sukai! Kumparan dapat berbentuk persegi panjang, lingkaran, atau lainnya!
2. Hubungkan kumparan pada sumber arus melalui penyangga kumparan.
3. Variasikanlah jumlah lilitan dalam kumparan dengan banyak sedikitnya batu baterai yang digunakan! Semakin sedikit batu baterai yang digunakan maka semakin efisien motor listrik yang kamu buat.
4. Gunakan ilustrasi di bawah ini untuk memperjelas rangkaian yang dimaksud! Letakkanlah dua magnet batang berseberangan di antara kumparan dan hadapkan dua kutub magnet yang tak sejenis!

5. Presentasikan motor buatan kelompokmu di depan kelas dan diskusikan kelebihan serta kekurangannya!
6. Setelah dipresentasikan, kumpulkan motor buatanmu di laboratorium untuk dijadikan media pembelajaran!
7. **Ingat**, setelah selesai melaksanakan praktikum, kembalikan peralatan (alat dan bahan) ke tempat semula dalam keadaan baik! Jaga kebersihan lingkungan dan kesehatanmu!

Rangkuman

1. Medan magnetik induksi adalah medan magnetik yang timbul akibat adanya arus listrik.
2. Besarnya kuat medan magnetik induksi sebanding dengan besarnya arus listrik yang mengalir.

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

3. Arah medan magnet induksi di sekitar arus listrik mengikuti kaidah tangan kanan Ampere.
4. Gaya Lorentz adalah gaya yang timbul pada muatan listrik yang bergerak di dalam medan magnetik.

$$F = IBL \sin \theta$$

5. Momen gaya yang timbul pada kumparan adalah sebagai berikut.

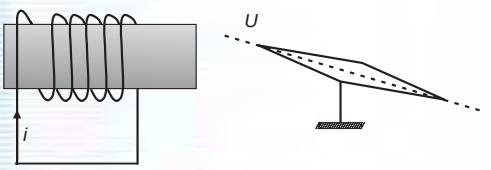
$$\tau = N \cdot I \cdot B \cdot A$$

Soal-soal Uji Kompetensi

A. *Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!*

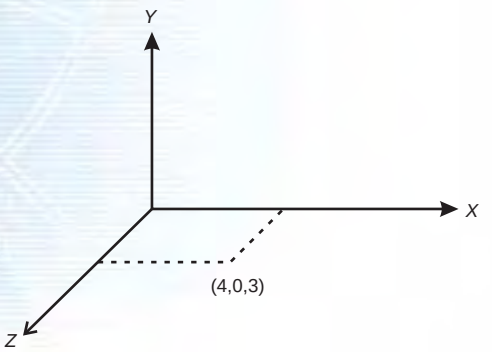
1. Sebatang penghantar yang sangat panjang dialiri arus listrik sebesar 2 A. Kuat medan magnetik induksi di sekeliling penghantar yang berjarak 4 cm adalah . . . .
   a. $4 \cdot 10^{-5}$ wb/m^2
   b. $2 \cdot 10^{-5}$ wb/m^2
   c. $1 \cdot 10^{-5}$ wb/m^2
   d. $0{,}5 \cdot 10^{-5}$ wb/m^2
   e. $0{,}25 \cdot 10^{-5}$ wb/m^2

2. Perhatikan gambar berikut!



   Ketika kumparan dialiri arus seperti gambar di atas, maka kutub utara magnet jarum akan bergerak ke . . . .
   a. kanan
   b. kiri
   c. atas
   d. bawah
   e. tak menentu

3. Pada koordinat kartesius (*XYZ*), sumbu *X* dan sumbu *Z* dialiri arus masing-masing 6 ampere dan 4 ampere searah sumbu positif. Besar dan arah medan magnetik induksi pada koordinat (4,0,3) cm adalah . . . .

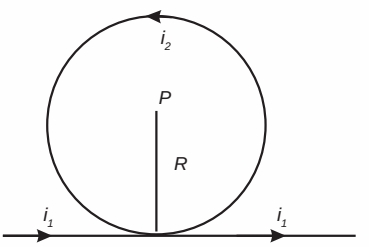


   a. $6 \cdot 10^{-5}$ wb/m^2 searah sumbu *Y* positif
   b. $6 \cdot 10^{-5}$ wb/m^2 searah sumbu *Y* negatif
   c. $2 \cdot 10^{-5}$ wb/m^2 searah sumbu *Y* positif
   d. $2 \cdot 10^{-5}$ wb/m^2 searah sumbu *Y* negatif
   e. 0

4. Kuat medan magnetik induksi di suatu titik yang berjarak 20 cm di sekitar penghantar berarus adalah 5.10^{-5} wb/m^2. Kuat arus listrik yang melalui penghantar tersebut adalah . . . .
   a. 2 ampere
   b. 5 ampere
   c. 10 ampere
   d. 20 ampere
   e. 50 ampere

5. Kuat medan magnetik induksi pada pusat lingkaran dengan jari-jari 10 cm yang dialiri arus 2 ampere adalah. . . .
   a. $-2\,\pi \cdot 10^{-6}$ wb/m^2
   b. $-4\,\pi \cdot 10^{-6}$ wb/m^2
   c. $-5\,\pi \cdot 10^{-6}$ wb/m^2
   d. $-6\,\pi \cdot 10^{-6}$ wb/m^2
   e. $-8\,\pi \cdot 10^{-6}$ wb/m^2

6. Dua buah kawat penghantar disusun sebagai berikut.



   $i_1 = i_2 = 2$ ampere, dan jari-jari lingkaran 4 cm. Kuat medan magnetik

induksi pada pusat lingkaran adalah . . . .

a. 10^{-5} wb/m^2
b. $10^{-5}\ \pi$ wb/m^2
c. $(1 - \pi) \cdot 10^{-5}$ wb/m^2
d. $(1 + \pi) \cdot 10^{-5}$ wb/m^2
e. $2\ \pi \cdot 10^{-5}$ wb/m^2

7. Sebatang kumparan dengan panjang 20 cm, terdiri atas 1.000 lilitan dialiri arus sebesar 100 mA. Kuat medan magnetik pada pusat kumparan tersebut adalah . . . .

a. $-2\ \pi \cdot 10^{-5}$ wb/m^2
b. $-2\ \pi \cdot 10^{-4}$ wb/m^2
c. $-2\ \pi \cdot 10^{-3}$ wb/m^2
d. $-2\ \pi \cdot 10^{-2}$ wb/m^2
e. $-2\ \pi \cdot 10^{-1}$ wb/m^2

8. Sebatang penghantar dialiri arus listrik ke arah utara di dalam medan magnet yang arahnya ke timur. Penghantar tersebut akan mengalami gaya Lorentz ke arah . . . .

a. barat
b. selatan
c. timur
d. atas
e. bawah

9. Sebuah partikel bermuatan *q* dengan massa *m* melintas memotong tegak lurus medan magnet dengan laju *v*. Jika kuat medan magnet adalah *B*, maka jari-jari lintasan partikel tersebut adalah . . . .

a. $\frac{mv}{Bq}$
b. $\frac{mq}{Bv}$
c. $\frac{Bv}{qm}$
d. $\frac{mB}{qv}$
e. $\frac{Bq}{mv}$

10. Sebuah kumparan dengan luas penampang 50 cm^2 terdiri atas 1.000 lilitan berada dalam medan magnetik 0,5 wb/m^2. Jika kumparan dialiri arus 0,5 ampere, momen gaya yang dialami kumparan saat penampang kumparan sejajar medan magnetik adalah . . . .

a. 0
b. 0,25 Nm
c. 0,50 Nm
d. 1,0 Nm
e. 1,5 Nm

B. *Kerjakan soal-soal berikut!*

1. Sepasang penghantar sejajar dengan panjang masing-masing *l* dan terpisah dengan jarak *d* satu sama lain. Jika keduanya dialiri arus dengan arah yang sama sebesar *i*, tunjukkan bahwa besarnya gaya magnetik persatuan panjang kedua penghantar adalah $\frac{\mu_o i^2}{2\pi d}$!

2. Suatu kumparan yang terdiri atas 500 lilitan berada dalam medan magnetik 0,5 wb/m^2 dialiri arus 2,5 ampere. Berapakah momen gaya yang timbul pada kumparan ketika penampang kumparan membentuk sudut 30° terhadap medan magnetik?

3. Sebuah bola logam dengan massa 1 gram bermuatan 10 C bergerak tegak lurus terhadap medan magnetik 10 wb/m^{2}dengan kecepatan 2 m/s. Tentukanlah jari-jari lintasan bola tersebut!

4. Sebuah kumparan berbentuk lingkaran mempunyai jari-jari 8 cm. Medan magnetik yang melingkupi kumparan adalah 0,6 wb/m^2. Jika arus yang melalui kumparan adalah 8 mA dan momen gaya yang dialami kumparan adalah $9 \cdot 10^{-3}$ Nm, tentukan banyaknya lilitan pada kumparan!

5. Sebuah kawat berarus 4 mA panjangnya 30 cm. Kuat medan magnetik yang ditimbulkan kawat adalah 2 wb/m^2. Jika kawat mengalami gaya Lorentz sebesar $1,2 \cdot 10^{-3}$ N, berapa besar sudut yang dibentuk oleh arah arus dan arah medan magnetik?

BAB
6

INDUKSI FARADAY DAN ARUS BOLAK-BALIK

Gerbang

Sumber: Dok. CAP

Gambar 6.1 Dinamo sepeda menghasilkan arus bolak-balik yang dapat menyalakan lampu

Lampu sepeda pada gambar di atas dapat menyala tanpa menggunakan baterai. Lalu, dari manakah energi listrik untuk menyalakan lampu tersebut berasal? Ketika sepeda berhenti, mengapa lampunya padam? Dinamo sepeda yang digerakkan oleh roda dapat menghasilkan arus listrik dengan prinsip seperti generator arus bolak-balik. Pada bab ini kita akan mempelajari lebih lanjut tentang arus bolak-balik tersebut.

Kata kunci: GGL Induksi – Arus Bolak-balik – Arus Sinusoidal – Rangkaian Seri RLC

A. GGL Induksi

Listrik yang kita gunakan sehari-hari adalah listrik arus bolak-balik yang dihasilkan oleh generator arus bolak-balik. Generator arus bolak-balik atau generator AC (*Alternating Current*) merupakan pembangkit tegangan dan arus bolak-balik. Generator ini terdiri atas *stator* yaitu komponen yang diam dan *rotor* sebagai komponen yang dapat berputar. Putaran kumparan pada generator akan menyebabkan terjadinya perubahan fluks magnetik yang menembus kumparan. Perubahan fluks magnetik inilah yang menyebabkan timbulnya arus listrik. Arus demikian dikenal dengan arus induksi. Sedangkan beda potensial antara ujung-

ujung kumparan disebut sebagai gaya gerak listrik (GGL) induksi. Besarnya GGL induksi sebanding dengan laju perubahan fluks magnetik yang menembus kumparan. Hal tersebut dirumuskan oleh Michael Faraday yang dikenal dengan hukum Faraday. Secara matematis, hukum Faraday dituliskan sebagai berikut.

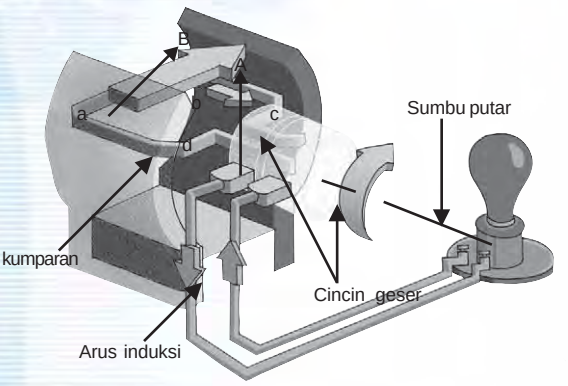
$$E = -N\frac{d\Phi}{dt} \quad \ldots (6.1)$$

Keterangan:

E : GGL induksi (volt)

N : jumlah lilitan kumparan

$\frac{d\Phi}{dt}$: laju perubahan fluks magnetik (wb/s)



Rep. Encharta Library 2005, Microsoft,USA

Gambar 6.2 Prinsip kerja generator arus bolak-balik (AC)

Perhatikan gambar 6.2 di atas! Perubahan fluks magnetik yang menembus kumparan *abcd* dirumuskan sebagai berikut.

$$d\Phi = d(BA\cos\theta) \quad \ldots (6.2)$$

Jika kita anggap kumparan berputar dengan frekuensi sudut ω selama t sekon maka $\theta = \omega t$.

$$d\Phi = d(BA\cos\omega t) \quad \ldots (6.3)$$

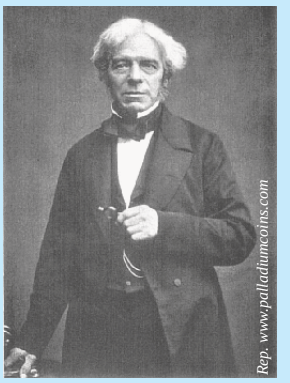
Berdasarkan hukum Faraday besarnya GGL induksi yang dihasilkan kumparan adalah:

$$E = -N\,d\Phi/dt = -NBA(-\sin\omega t)$$
$$E = NBA\omega\sin\omega t \quad \ldots (6.4)$$

Persamaan 6.4 menunjukkan harga GGL induksi yang dihasilkan dari generator AC berubah menurut fungsi sinus. Harga $NBA\omega$ tetap. Harga ini tidak lain adalah harga maksimum dari GGL induksi yang dihasilkan generator tersebut. Dengan demikian, GGL induksi yang dihasilkan oleh generator AC dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$E_t = E_{maks.}\sin\omega t \quad \ldots (6.5)$$

Sebaiknya Tahu



Rep. www.palladiumcoins.com

Gambar 6.3 Michael Faraday

Michael Faraday (1791–1867)

Michael Faraday adalah seorang fisikawan dan kimiawan Inggris yang terkenal dengan hukum induksi elektromagnetik dan hukum elektrolisis. Ia mendapatkan penghargaan dari Royal Society (Perkumpulan Ilmuwan Inggris pada waktu itu) atas berbagai sumbangannya di bidang fisika dan kimia.

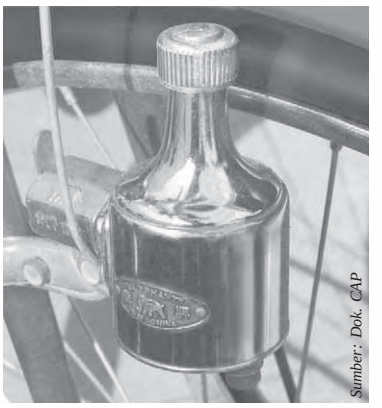
B. Penerapan Induksi Elektromagnetik

Banyak peralatan di sekitar kita yang bekerja dengan prinsip induksi elektromagnetik. Alat-alat tersebut antara lain:

1. Dinamo Sepeda

Prinsip kerja dinamo sepeda identik dengan prinsip kerja generator. Demikian pula komponen-komponennya.

Untuk menggerakkan kumparan pada dinamo sepeda, bagian kepala dinamo menempel roda. Dengan demikian, ketika roda berputar bagian kepala dinamo pun ikut berputar. Bagian kepala ini berhubungan dengan poros kumparan dinamo. Itulah sebabnya, ketika sepeda bergerak cepat, lampu sepeda akan menyala lebih terang. Hal ini dikarenakan kumparan ikut berputar cepat. Putaran yang cepat menyebabkan fluks magnetik yang menembus kumparan berubah dengan cepat pula.

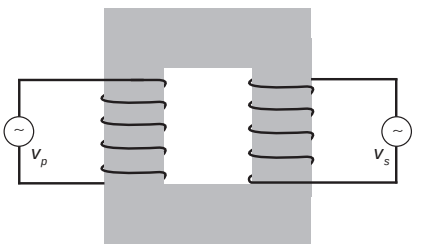


Gambar 6.4 Dinamo sepeda menggunakan prinsip kerja generator

2. Transformator

Dasar timbulnya GGL induksi adalah karena adanya perubahan fluks magnetik yang menembus kumparan. Untuk menimbulkan perubahan fluks magnetik ini, kita dapat membangkitkannya dengan mengalirkan arus listrik yang berubah setiap saat. Prinsip seperti ini digunakan pada transformator (trafo). Transformator adalah alat yang digunakan untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik arus bolak-balik.

Transformator terdiri atas kumparan primer dan kumparan sekunder yang dililitkan pada teras besi. Perhatikan gambar 6.5 berikut!



Gambar 6.5 Transformator

Kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan arus bolak-balik. Sedangkan kumparan sekunder menghasilkan tegangan keluaran (*output*).

Ketika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan maka pada kumparan akan mengalir arus listrik. Arus listrik ini akan menyebabkan timbulnya medan magnetik induksi. Arus yang mengalir pada kumparan adalah arus bolak-balik yang harganya selalu berubah sehingga medan magnetik yang timbul akan selalu berubah seiring dengan perubahan arus pada kumparan primer.

Medan magnetik selalu diteruskan oleh teras kumparan sehingga kumparan sekunder akan ditembus oleh medan magnetik yang berubah. Akibatnya, pada ujung-ujung kumparan sekunder timbul GGL induksi. Jika jumlah lilitan kumparan primer adalah N_p dan jumlah lilitan kumparan sekunder adalah N_s maka berlaku hubungan:

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

Keterangan:

N_p : jumlah lilitan primer
N_s : jumlah lilitan sekunder
V_p : tegangan primer (*input*)
V_s : tegangan sekunder (*output*)

Agar kamu lebih paham tentang induksi elektromagnetik pada transformator, lakukanlah diskusi berikut ini!

Diskusi

Diskusikan bersama kelompokmu!

1. Mengapa transformator tidak dapat menaikkan atau menurunkan tegangan arus searah?
2. Apakah dengan naiknya tegangan *output* berarti daya pada kumparan *output* juga ikut naik? Mengapa?
3. Setelah selesai berdiskusi, presentasikan hasilnya di depan kelas!
4. Berikan kesempatan kepada kelompok lain untuk menanggapinya!

C. Tegangan dan Arus Sinusoidal

Pada pembahasan sebelumnya kita telah mempelajari bahwa GGL induksi yang dihasilkan oleh generator arus bolak-balik selalu berubah menurut fungsi sinus. Oleh karena itu, GGL induksi atau tegangan arus listrik yang dihasilkan tersebut dinamakan tegangan dan arus sinusoidal.

Tegangan dan Arus Sinusoidal

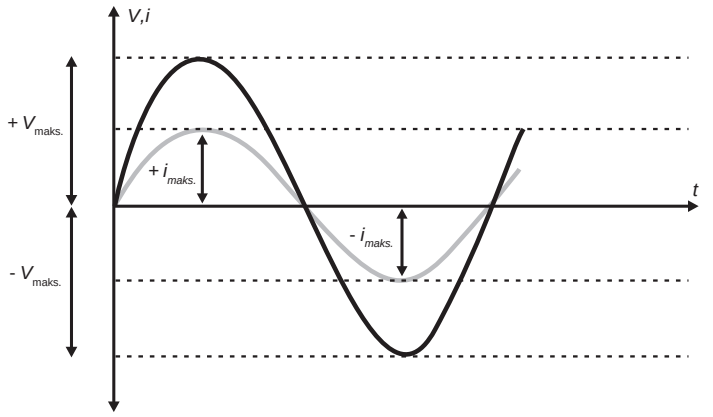
Tegangan dan arus sinusoidal adalah tegangan dan arus yang berubah terhadap waktu menurut fungsi sinus. Coba perhatikan kembali persamaan 6.5 pada halaman 97! Jika tegangan kita nyatakan dengan V dan arus kita nyatakan dengan i maka persamaan 6.5 dari generator AC dapat kita adopsi untuk menuliskan persamaan tegangan dan arus sinusoidal sebagai berikut.

$$V = V_{maks.} \sin \omega t \quad \ldots (6.6)$$

dan

$$i = i_{maks.} \sin \omega t \quad \ldots (6.7)$$

Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar 6.6 di bawah ini!



Gambar 6.6 Fungsi tegangan dan arus sinusoidal

Tegangan dan arus sinusoidal merupakan fungsi periodik. Dari fungsi ini kita akan menentukan harga rata-rata serta harga efektif dari tegangan dan arus bolak-balik.

1. Harga Rata-rata

Harga rata-rata dari tegangan dan arus bolak-balik dapat ditentukan dengan mengambil setengah periode dari gelombang sinusoidal (π). Dari sini kita dapat menghitung harga rata-ratanya, yaitu:

$$V_r = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} V_{maks.} \sin d(\omega t)$$

$$V_r = \frac{V_{maks.} \cdot (-\cos \pi + \cos 0)}{2\pi}$$

$$V_r = \frac{V_{maks.}}{\pi} \quad \ldots (6.8)$$

Keterangan:

V_r : tegangan rata-rata

$V_{maks.}$: tegangan maksimum

Dengan cara yang sama harga arus rata-ratanya adalah:

$$i_r = \frac{i_{maks.}}{\pi} \quad \ldots (6.9)$$

Keterangan:

i_r : kuat arus rata-rata

$i_{maks.}$: kuat arus maksimum

2. Harga Efektif

Harga efektif arus sinusoidal didefinisikan sebagai harga arus sedemikian rupa sehingga menghasilkan energi kalor rata-rata yang sama pada arus searah pada suatu hambatan *R*.

Harga Efektif

Pada arus searah, energi kalor yang dihasilkan pada suatu hambatan R adalah $i^2 \cdot R$.

$$i^2_{ef} = i^2_{maks.} \cdot R\ (sin^2\ \omega\ t)_{rata\text{-}rata} \quad \ldots (6.10)$$

Dengan bantuan operasi trigonometri, $sin^2\ \omega\ t = \frac{1}{2}(1 - cos\ 2\omega\ t)$ dan harga rata-rata $cos\ \omega\ t = 0$ maka:

$$i^2_{ef} \cdot R = \frac{1}{2} \cdot i^2_{maks.} \cdot R \text{ atau}$$

$$i_{ef} = \frac{1}{2} \cdot i_{maks.} \cdot \sqrt{2} \approx 0{,}707 \cdot i_{maks.} \quad \ldots (6.11)$$

Jadi, dengan cara yang sama dapat kita tentukan harga efektif tegangan sinusoidal, yaitu:

$$V_{ef} = \frac{1}{2} \cdot V_{maks.} \cdot \sqrt{2} \approx 0{,}707 \cdot V_{maks.} \quad \ldots (6.12)$$

Harga efektif adalah harga yang terbaca pada alat ukur voltmeter maupun amperemeter AC.

Untuk lebih jelasnya, simaklah contoh soal di bawah ini!

Contoh Soal

Sebuah generator menghasilkan tegangan sinusoidal dengan persamaan $V = 100\ sin\ 100\pi\ t$. V dalam volt, t dalam sekon. Tentukanlah harga tegangan efektif dan rata-ratanya!

Penyelesaian:

Diketahui: $V = 100 \sin 100\pi\ t$

Ditanyakan: $V_{ef} = \ldots ?$

$V_r = \ldots ?$

Jawab:

Dengan persamaan 6.12 dan 6.8, kita dapatkan:

$V_{ef} = 0{,}707 \cdot V_{maks.} = 0{,}707 \cdot 100 = 70{,}7$ volt

$V_r = \frac{100}{\pi}$ volt

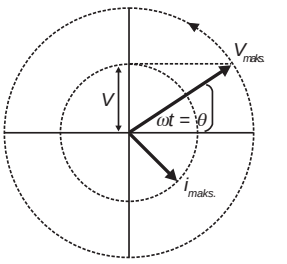
D. Diagram Fasor

Besaran-besaran pada tegangan dan arus sinusoidal adalah besaran-besaran gelombang. Pada bagian ini kita akan mempelajari bagaimana menganalisis besaran-besaran yang ada pada arus dan tegangan sinusoidal.

Fasor

Guna mempermudah dalam menganalisa tegangan dan arus sinusoidal digunakan fasor. Fasor berasal dari kata "*phase*" dan "*vector*" dalam bahasa inggris yang artinya adalah "vektor fase". Fasor digunakan untuk menyatakan besaran-besaran dalam arus bolak-balik, misalnya tegangan dan arus.

Perhatikan gambar 6.7 di samping! Panjang anak panah menyatakan harga maksimum besaran-besaran tersebut (V dan i). Fasor diasumsikan berputar dengan laju tetap sebesar ω sama dengan frekuensi sudut tegangan atau arus. Karena fasor berputar terus menerus maka sudutnya terhadap suatu garis atau sumbu juga berubah. Sudut ini menyatakan sudut fase θ yang besarnya adalah ωt. Proyeksi fasor pada sumbu vertikal adalah harga sesaatnya.



Gambar 6.7 Diagram fasor yang menunjukkan fase tegangan mendahului arus

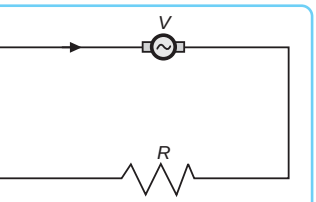
E. Rangkaian Arus Bolak-balik

Rangkaian arus bolak-balik memiliki perbedaan-perbedaan jika dibandingkan dengan rangkaian arus searah. Perbedaan tersebut bukan hanya pada komponen besaran-besarannya yang ditinjau secara vektor, tetapi juga pada adanya perbedaan fase antara arus dan tegangannya.

Berikut ini adalah rangkaian arus bolak-balik.

1. Rangkaian Resistif

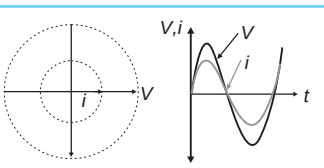
Rangkaian resistif adalah rangkaian yang hanya mengandung hambatan (R) saja. Perhatikan gambar 6.8a di samping! Pada rangkaian ini V dan i memiliki fase yang sama, artinya i dan V mencapai harga 0 dan maksimum bersama-sama. Diagram fasor pada rangkaian resistif ditunjukkan pada gambar 6.8b.



Gambar 6.8a Rangkaian resistif

Dalam hal ini berlaku hubungan:

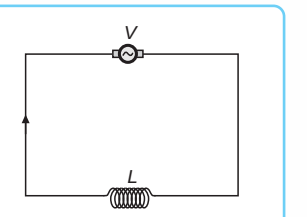
$$i = \frac{V}{R} \qquad \ldots (6.13)$$



Gambar 6.8b Diagram fasor dan grafik perubahan tegangan dan arus sinusoidal pada rangkaian resistif

2. Rangkaian Induktor Murni (Induktif)

Rangkaian induktif adalah rangkaian yang hanya terdiri atas induktor (kumparan) dengan mengabaikan hambatan pada kawat kumparan. Bagan rangkaian induktif ditunjukkan pada gambar 6.9a.



Gambar 6.9a Rangkaian induktor murni pada arus bolak-balik

Seperti telah kita pelajari pada bab sebelumnya, pada kumparan akan timbul GGL induktansi akibat aliran arus bolak-balik yang melalui kumparan. Besarnya GGL induktansi adalah $E = -L\frac{di}{dt}$.

Sesuai hukum Kirchoff maka berlaku hubungan:

$$V + L\frac{di}{dt} = 0$$

atau

$$V = -L\frac{di}{dt} \qquad \ldots (6.14)$$

Jika arus yang melalui rangkaian memiliki persamaan $i = i_{maks.} \cdot \sin \omega t$ maka persamaan 6.14 dapat dituliskan sebagai berikut.

$$V = -L\, i_{maks.} \frac{d \sin \omega t}{dt}$$

$$V = -\omega L\, i_{maks.} \cos \omega t \text{ atau}$$

$$V = \omega L\, i_{maks.} \cos \omega t \quad \ldots (6.15)$$

Besaran $\omega L\, i_{maks.}$ tidak lain adalah $V_{maks.}$. Sesuai dengan hukum Ohm, akan kita peroleh:

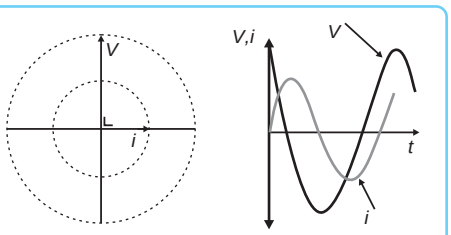
$$i_{maks.} = \frac{V_{maks.}}{\omega L} \quad \ldots (6.16)$$

Reaktansi Induktif

Besaran ωL identik dengan hambatan pada rangkaian arus searah. Besaran ini disebut dengan reaktansi induktif dan disimbolkan dengan x_L. Satuan untuk reaktansi induktif adalah *ohm* (Ω). Secara umum persamaan 6.16 dapat juga ditulis sebagai berikut.

$$i = \frac{V}{X_L} \quad \ldots (6.17)$$

Untuk menganalisis fase tegangan dan arus pada rangkaian ini dapat kita lihat pada persamaan 6.17. Di sini jelas bahwa fase tegangan mendahului arus sebesar 90° atau $\frac{1}{2}\pi$. Hubungan antara V dan i pada rangkaian induktif tersebut dalam diagram fasor dapat kita lihat pada gambar 6.9b di samping! Untuk lebih jelasnya, perhatikan contoh soal berikut!



Gambar 6.9b Diagram fasor dan grafik perubahan tegangan dan arus sinusoidal pada rangkaian induktif

Contoh Soal

Sebuah kumparan 10 mH dihubungkan dengan sumber arus bolak-balik 2 V, 100 Hz. Tentukanlah kuat arus yang melalui rangkaian tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui: $L = 10$ mH

$V = 2$ V

$f = 100$ Hz

Ditanyakan: $i = \ldots ?$

Jawab:

$$i = \frac{V}{X_L} = \frac{V}{\omega \cdot L}$$

$$= \frac{2}{200\pi \cdot 10^{-2}}$$

$$= \frac{1}{\pi} = 0{,}32 \text{ ampere}$$

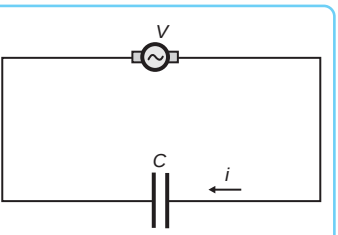
3. Rangkaian Kapasitor Murni (Kapasitif)

Sebelum kamu mempelajari rangkaian kapasitor murni, diskusikanlah dengan temanmu hal-hal berikut!

a. Dapatkah kapasitor dilalui arus searah? Mengapa?

b. Dapatkah kapasitor dilalui arus bolak-balik? Mengapa?

Rangkaian kapasitor murni hanya terdiri atas kapasitor dan sumber tegangan, seperti ditunjukkan pada gambar 6.10a. Besarnya arus listrik yang melalui kapasitor dinyatakan sebagai berikut.



Gambar 6.10a Rangkaian kapasitor murni pada arus bolak-balik

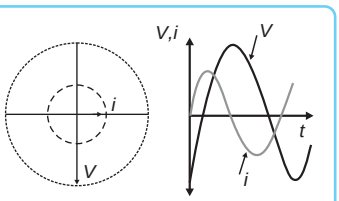
$$i = \frac{dQ}{dt} \quad \ldots (6.18)$$

Sedangkan beda potensial (tegangan listrik) pada ujung-ujung kapasitor dinyatakan:

$$V_C = \frac{Q}{C} \quad \ldots (6.19)$$

Berdasarkan hukum Kirchoff bahwa:

$$V - V_c = 0 \quad \ldots (6.20)$$



Gambar 6.10b Diagram fasor dan grafik perubahan arus dan tegangan pada rangkaian kapasitif

Jika sumber tegangan kita misalkan memiliki persamaan $V = V_{maks.} \sin \omega t$, dari persamaan 6.19 dan 6.20 kita dapatkan hubungan:

$$V_{maks.} \sin \omega t = \frac{Q}{C}$$

dan

$$Q = V_{maks.}\, C \sin \omega t \quad \ldots (6.21)$$

Dengan demikian, persamaan arusnya dapat kita tuliskan sebagai berikut.

$$i = \frac{dQ}{dt} = \omega C V_{maks.} \cos \omega t \quad \ldots (6.22)$$

Besaran $\omega C V_{maks.}$ tidak lain adalah arus maksimum ($i_{maks.}$). Berdasarkan hukum Ohm bahwa $i = \frac{V}{R}$, kita dapatkan besaran yang identik dengan R. Besaran ini disebut reaktansi kapasitif dan disimbolkan dengan X_C.

Dapat disimpulkan bahwa pada rangkaian kapasitif berlaku hal-hal sebagai berikut.

a. Fase arus mendahului fase tegangan sebesar 90° atau $\frac{1}{2}\pi$.

b. Besarnya reaktansi kapasitifnya adalah $x_C = \frac{1}{\omega C}$.

Diagram fasor pada rangkaian ini dapat kita lihat pada gambar 6.10b. Untuk lebih jelasnya, simaklah contoh soal berikut ini!

Contoh Soal

Sebuah kapasitor 1μF dihubungkan dengan sumber tegangan arus bolak-balik yang memiliki persamaan $V = 5\ sin\ 100\ t$, V dalam volt, t dalam sekon.

Tentukanlah persamaan arus yang melalui rangkaian tersebut sebagai fungsi waktu!

Penyelesaian:

Diketahui: $C = 1\mu F$

$V = 5\ sin\ 100\ t$

Ditanyakan: $i(t) = \ldots ?$

Jawab:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{100 \cdot 10^{-6}} = 10^4 \text{ ohm}$$

Pada rangkaian kapasitif, fase i mendahului V sebesar $\frac{1}{2}\pi$.

$$i(t) = \frac{V}{X_C} = \frac{5 \sin (100t + \frac{1}{2}\pi)}{10^{-4}} = 5 \cdot 10^{-4} \sin (100t + \frac{\pi}{2})$$

4. Rangkaian Seri RLC

Pada pembahasan terdahulu kita telah mempelajari sifat-sifat rangkaian pada R, L, dan C yang masing-masing berdiri sendiri. Bagaimanakah sifat rangkaiannya jika kita mengombinasikan komponen-komponen tersebut pada suatu rangkaian?

Sebelum membahas lebih jauh tentang rangkaian seri RLC pada arus bolak-balik secara sederhana, marilah kita lakukan percobaan sederhana di bawah ini!

Praktikum

Rangkaian Seri RLC

A. Tujuan

Mempelajari sifat rangkaian seri RLC pada arus bolak-balik.

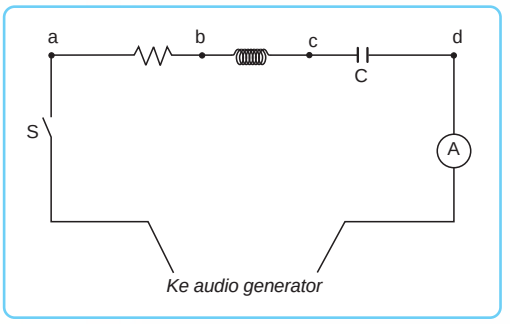
B. Alat dan Bahan

1.	Papan rangkaian	1 buah
2.	Hambatan tetap 100 ohm	1 buah
3.	Kapasitor 1 μF	1 buah
4.	Kumparan 1.000 lilitan dengan inti besi	1 buah
5.	Saklar	1 buah
6.	*Audio generator*	1 buah
7.	Voltmeter AC atau multitester	1 buah

8. Amperemeter AC — 1 buah
9. Jembatan penghubung — 1 buah
10. Kabel penghubung merah — secukupnya
11. Kabel penghubung hitam — secukupnya

C. Langkah Kerja

1. Susunlah alat seperti skema berikut pada papan rangkaian!



2. Atur voltmeter dengan batas ukur 10 Volt AC!
3. Hubungkan *audio generator* dengan sumber tegangan PLN! Saklar *audio generator* pada posisi *off* dengan pengaturan sebagai berikut.
   a. Pilih skala tegangan 10 *x* 10 mV_{rms}!
   b. Pilih jenis gelombang sinusoidal!
   c. Frekuensi awal 100 Hz.
4. Periksalah kembali rangkaian!
5. Hidupkan *audio generator* (*on*)!
6. Tutup saklar S!
7. Ukurlah tegangan V_{ab} (V_R), V_{bc} (V_L), V_{cd} (V_C), dan V_{ad} (V_{tot})!
8. Ulangi langkah 6 dengan frekuensi 500 Hz dan 1.000 Hz! Catatlah hasilnya pada tabel seperti berikut!

Tabel Pengamatan

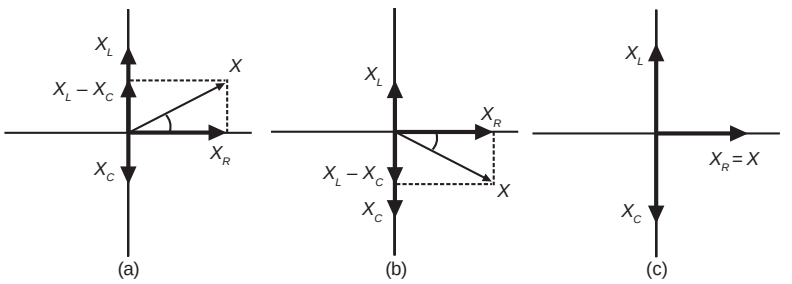
No.	Frekuensi	V_L	V_R	V_C	V_{tot}	$\sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2}$
1.	100 Hz					
2.	500 Hz					
3.	1.000 Hz					

9. Bandingkan harga V_{tot} dengan $\sqrt{V_R^2 + (V_L - V_C)^2}$!
10. Buatlah kesimpulan dari hasil percobaan yang kamu lakukan!

Peringatan:

a. Berhati-hatilah dalam menggunakan peralatan yang berhubungan dengan listrik!
b. Setelah selesai, kembalikan alat-alat percobaan ke tempat semula!

Rangkaian seri RLC banyak digunakan pada osilator untuk membangkitkan getaran gelombang elektromagnetik. Pada rangkaian ini akan terjadi peristiwa resonansi, yaitu peristiwa ikut bergetarnya suatu benda karena getaran benda lain. Resonansi pada rangkaian seri RLC terjadi saat harga $V_L = V_C$ atau $X_L = X_C$. Perhatikan diagram fasor berikut!



Gambar 6.11 Diagram fasor tegangan pada rangkaian seri RLC (a) keadaan di mana $X_L > X_C$ (b) keadaan di mana $X_L < X_C$ (c) keadaan di mana $X_L = X_C$

Tiga kemungkinan yang akan terjadi pada rangkaian seri RLC yaitu:

a. Keadaan di mana $X_L > X_C$

Pada keadaan ini rangkaian lebih bersifat induktif (lihat gambar 6.11a).

Dalam hal ini berlaku:

$$Z = \sqrt{X_R{}^2 + (X_L - X_C)^2} \quad \ldots (6.23)$$

Keterangan:

Z : impedansi rangkaian (Ohm)

Harga tegangannya adalah:

$$V = \sqrt{V_R{}^2 + (V_L - V_C)^2} \quad \ldots (6.24)$$

Kuat arus yang melalui rangkaian adalah:

$$i = \frac{V}{Z} \quad \ldots (6.25)$$

Karena fase i sefase dengan V_R maka fase tegangan mendahului i sebesar θ, di mana:

$$\tan \theta = \frac{V_L}{V_R} = \frac{X_L}{R} \quad \ldots (6.26)$$

b. Keadaan di mana $X_L < X_C$

Pada keadaan ini rangkaian lebih bersifat kapasitif (lihat gambar 6.11b di atas).

Dalam hal ini berlaku:

$$Z = \sqrt{X_R{}^2 + (X_C - X_L)^2} \quad \ldots (6.27)$$

dan harga tegangannya adalah:

$$V = \sqrt{V_R^{\,2} + (V_C - V_L)^2} \qquad \ldots (6.28)$$

Fase tegangan tertinggal oleh *i* sebesar θ, dengan

$$\tan \theta = \frac{V_C}{V_R} = \frac{X_C}{R} \qquad \ldots (6.29)$$

c. Keadaan di mana $X_L = X_C$

Resonansi

Pada keadaan ini dikatakan rangkaian mengalami resonansi. Resonansi terjadi pada saat harga impedansi $Z = R$ atau mencapai harga terkecil karena besar reaktansi induktifnya sama dengan reaktansi kapasitifnya. Sedangkan kuat arus *i* akan mencapai harga maksimum dan fase tegangan tidak mengalami perubahan.

Besarnya frekuensi resonansi dapat dihitung sebagai berikut.

$$X_L = X_C$$

$$\omega \cdot L = f_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

$$\omega^2 = \frac{1}{L \cdot C}$$

$$4\pi f^2 = \frac{1}{L \cdot C}$$

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \qquad \ldots (6.30)$$

Keterangan:

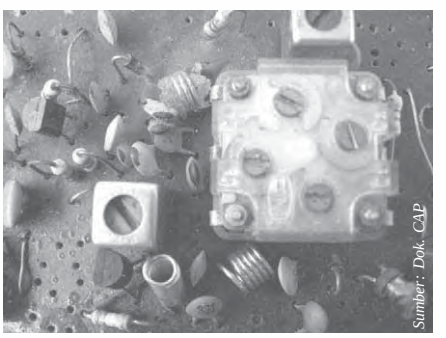
f_0 : frekuensi resonansi (Hz)

L : induktansi (henry)

C : kapasitansi kapasitor (farad)

Rangkaian RLC antara lain digunakan pada pesawat penerima radio. Kapasitor variabel pada pesawat penerima radio berfungsi sebagai penala (*tuner*) untuk mengubah harga frekuensi resonansinya.

Agar lebih jelas mengenai rangkaian RLC, pelajarilah contoh soal di bawah ini!



Gambar 6.12 Rangkaian radio penerima yang memanfaatkan rangkaian RLC sebagai penala (*tuner*)

Contoh Soal

Sebuah osilator dengan rangkaian RLC seri diharapkan menghasilkan frekuensi resonansi 100 MHz. Jika kapasitor yang digunakan 1nF, berapakah induktansi yang ada pada kumparannya?

Penyelesaian:

Diketahui: f = 100 MHz

C = 1 nF

Ditanyakan: L = . . . ?

Jawab:

Dengan menggunakan persamaan 6.30 kita dapatkan:

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

$$\sqrt{L \cdot C} = \frac{1}{f_0}$$

$$L \cdot C = \left(\frac{1}{f_0}\right)^2$$

$$L \cdot 1 \cdot 10^{-9} = \left(\frac{1}{100 \cdot 10^6}\right)^2$$

$$L \cdot 10^{-9} = \left(\frac{1}{10^8}\right)^2$$

$$L = \frac{1}{10^{16} \cdot 10^{-9}}$$

$$L = \frac{1}{10^7}$$

$$L = 10^{-7}\ \text{H}$$

$$L = 100\ \text{nH}$$

F. Daya pada Rangkaian Arus Bolak-Balik

Sebelumnya di kelas X kamu telah mempelajari daya pada arus searah. Bagaimana dengan daya pada arus bolak-balik? Apakah sama? Untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut simaklah pembahasan berikut ini!

Jika induktor dialiri arus bolak-balik maka di dalam maupun di sekitar induktor akan timbul medan magnetik. Untuk menimbulkan medan magnetik diperlukan sejumlah energi. Jika arus mencapai harga nol maka medan magnetiknya lenyap. Bersamaan dengan lenyapnya medan magnetik, energi yang tersimpan di dalam induktor berubah menjadi energi listrik dalam bentuk arus listrik induksi. Peristiwa ini berlangsung hanya dalam waktu singkat tetapi berulang-ulang sehingga terjadi pengalihan bolak-balik energi dari rangkaian ke medan magnetik.

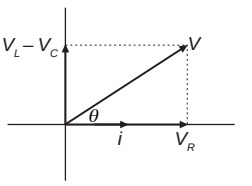
Hal yang sama terjadi dalam rangkaian arus bolak-balik pada kapasitor. Ketika dilalui arus listrik, pada kapasitor akan timbul medan magnetik. Pada saat arus mencapai harga nol, medan magnetik lenyap seiring dengan pelucutan muatan pada kapasitor di mana medan listrik ini berubah menjadi arus pada rangkaian. Lebih jelasnya, baik pada rangkaian induktor maupun kapasitor terjadi penyerapan energi.

Lain halnya pada resistor, di mana terjadi perubahan energi listrik menjadi kalor yang tidak dapat berubah menjadi listrik kembali. Besarnya energi per satuan waktu disebut daya. Daya pada rangkaian arus bolak-balik adalah daya rata-rata yang dipasok ke dalam resistor yang besarnya dinyatakan sebagai berikut.

Daya

$$P_r = I^2_{ef} R = I_{ef} \cdot V_R \quad \ldots (6.31)$$

Dalam hal ini V_R adalah komponen tegangan yang sefase dengan arus. Perhatikan diagram fasor yang ditunjukkan oleh gambar 6.13 di samping!



Gambar 6.13 Diagram fasor untuk menyatakan daya pada rangkaian arus bolak-balik

Berdasarkan diagram tersebut, daya rata-rata dapat kita nyatakan sebagai berikut.

$$P_r = I_{ef} \cdot V \cdot \cos \theta \quad \ldots (6.32)$$

Besaran $\cos \theta$ disebut sebagai faktor daya.

$$\cos \theta = \frac{V_R}{V} = \frac{R}{Z} \quad \ldots (6.33)$$

Dengan demikian dapat kita ketahui bahwa resonansi terjadi saat $\cos \theta = 1$, di mana $X_L = X_C$.

Untuk memantapkan pemahamanmu, kerjakan pelatihan berikut ini!

Kerja Mandiri

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

1. Suatu peralatan listrik bertuliskan 100 W, 220 V. Jelaskan arti karakteristik tersebut!
2. Seorang siswa merancang pembangkit listrik sederhana dengan menggunakan dinamo rakitan. Ia menggunakan kumparan yang terdiri atas 10.000 lilitan dengan luas penampang 100 cm^2. Dinamo direncanakan berputar dengan frekuensi 50 Hz. Tentukanlah:
   a. tegangan maksimum,
   b. tegangan rata-rata,
   c. tegangan efektif yang dihasilkan dinamo tersebut.
3. Carilah informasi bagaimana sebuah osilator pada radio pemancar bekerja! Kamu dapat mencarinya di perpustakaan atau sumber lain, misalnya internet. Diskusikanlah hasil kerjamu dengan teman-teman sekelas!

Rangkuman

1. GGL induksi adalah gaya gerak listrik yang dihasilkan oleh perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu penghantar.
2. Transformator berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan arus bolak-balik.

   Pada transformator berlaku:

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

3. Tegangan dan arus sinusoidal adalah tegangan dan arus yang harganya berubah menurut fungsi sinus.

   $$V = V_{maks.} \sin \omega t$$
   $$i = i_{maks.} \sin \omega t$$

4. Harga rata-rata arus dan tegangan sinusoidal adalah sebagai berikut.

   $$V_{rata\text{-}rata} = \frac{V_{maks.}}{\pi}$$
   $$i_{rata\text{-}rata} = \frac{i_{maks.}}{\pi}$$

5. Harga efektif arus sinusoidal didefinisikan sebagai harga arus sedemikian rupa sehingga menghasilkan energi kalor rata-rata yang sama pada arus searah pada suatu hambatan *R*.

   $$i_{ef} = \frac{1}{2} \cdot i_{maks.} \cdot \sqrt{2} \approx 0{,}707 \cdot i_{maks.}$$

6. Harga efektif tegangan sinusoidal adalah sebagai berikut.

   $$V_{ef} = \frac{1}{2} \cdot V_{maks.} \cdot \sqrt{2} \approx 0{,}707 \cdot V_{maks.}$$

7. Pada rangkaian arus bolak-balik terjadi pergeseran fase tegangan dan arus ketika melalui rangkaian.
8. Pada rangkaian resistif arus bolak-balik berlaku hubungan:

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

9. Pada rangkaian induktif arus bolak-balik berlaku hubungan:

   $$i = \frac{V}{X_L}$$

10. Pada rangkaian kapasitif arus bolak-balik berlaku hubungan:

$$i = \omega\ C\ V_{maks.} \cos \omega t$$

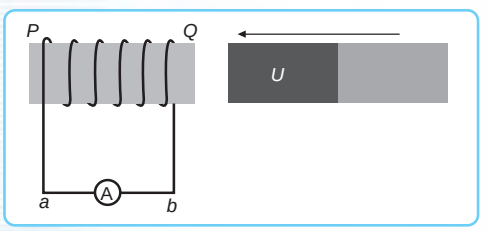
11. Resonansi pada rangkaian RLC terjadi ketika harga-harga reaktansi induktif dan kapasitif mencapai harga yang sama.

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

Soal-soal Uji Kompetensi

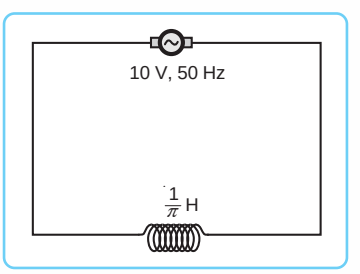
A. *Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!*

1. Sebuah induktor 100 mH, dialiri arus yang berubah bergantung waktu dengan persamaan $i = t(1 - 4t)$, i dalam A, dan t dalam sekon. Besarnya GGL induktansi yang timbul pada ujung-ujung induktor saat $t = 2$ sekon adalah . . . .
   a. 1,5 volt
   b. 3,0 volt
   c. 15 volt
   d. 30 volt
   e. 300 volt
2. Perhatikan gambar berikut!

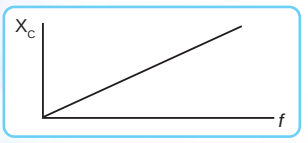


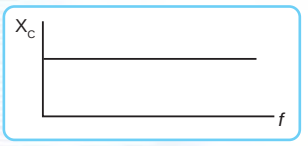
   Ketika kutub utara bergerak mendekati kumparan maka yang terjadi adalah . . . .
   a. Q menjadi kutub selatan magnet induksi, arus mengalir dari a ke b
   b. Q menjadi kutub selatan magnet induksi, arus mengalir dari b ke a
   c. Q menjadi kutub utara magnet induksi, arus mengalir dari a ke b
   d. Q menjadi kutub utara magnet induksi, arus mengalir dari b ke a
   e. Q menjadi kutub utara magnet induksi, arus mengalir dari p ke q
3. Sebuah sumber tegangan arus sinusoidal menghasilkan tegangan efektif 250 volt. Harga tegangan maksimum dan tegangan rata-ratanya adalah….
   a. $500\sqrt{2}$ volt dan $\frac{500}{\pi}\sqrt{2}$ volt
   b. $\frac{500}{\pi}\sqrt{2}$ volt dan $500\sqrt{2}$ volt
   c. $500\sqrt{2}$ volt dan $\frac{500}{\pi}\sqrt{2}$ volt
   d. $\frac{500}{\pi}\sqrt{2}$ volt dan $500\sqrt{2}$ volt
   e. $\frac{125}{\pi}\sqrt{2}$ volt dan $125\sqrt{2}$ volt
4. Pernyataan berikut ini berhubungan dengan sifat rangkaian resistif pada rangkaian arus bolak-balik.
   1) Besarnya hambatan sebanding dengan frekuensi.
   2) Fase arus tertinggal oleh tegangan sebesar $\frac{\pi}{2}$.
   3) Fase tegangan mendahului arus sebesar $\frac{\pi}{2}$.
   4) Berlaku hukum Ohm.

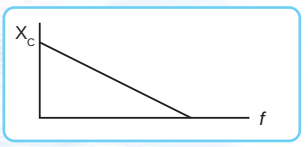
   Dari pernyataan di atas yang benar adalah . . . .
   a. 1), 2), dan 3)
   b. 1) dan 3)
   c. 2) dan 4)
   d. 4) saja
   e. 1), 2), 3) dan 4)
5. Perhatikan rangkaian berikut!

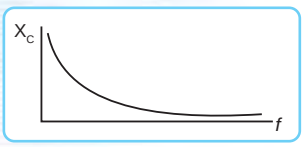


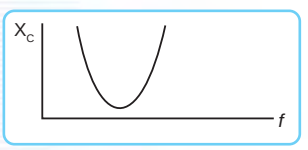
   Arus yang melalui rangkaian tersebut adalah . . . .
   a. 10 ampere
   b. 2 ampere
   c. 1 ampere
   d. 0,1 ampere
   e. 0,2 ampere
6. Grafik berikut yang menunjukkan hubungan antara reaktansi kapasitif dengan frekuensi arus pada rangkaian kapasitor murni adalah . . . .

a. 

b. 

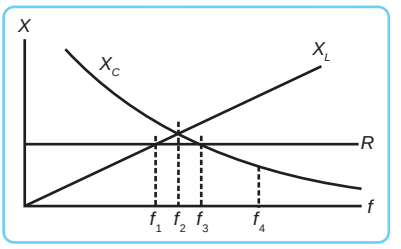
c. 

d. 

e. 

7. Sebuah kumparan ketika dihubungkan dengan sumber arus searah 3 volt padanya mengalir arus 0,1 ampere. Saat sumber tegangan diganti dengan 3 volt AC besarnya arus yang mengalir 0,06 ampere. Jika frekuensi arus bolak-balik 50 Hz maka besarnya induktansi kumparan tersebut adalah . . . .
   a. $\frac{0,2}{\pi}$ henry
   b. $\frac{0,3}{\pi}$ henry
   c. $\frac{0,4}{\pi}$ henry
   d. $\frac{0,5}{\pi}$ henry
   e. $\frac{0,6}{\pi}$ henry

8. Grafik berikut menunjukkan hubungan X_L, X_C, R, dan f pada rangkaian seri RLC.



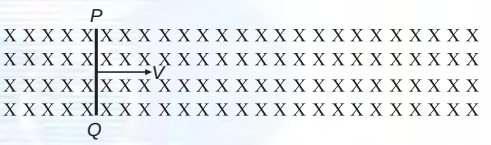
   Dari grafik di atas, resonansi terjadi pada frekuensi . . . .
   a. 0
   b. f_1
   c. f_2
   d. f_3
   e. f_4

9. Rangkaian seri RLC mengalami resonansi pada frekuensi 100 Mhz. Jika induktor pada rangkaian sebesar 10 mH, besarnya kapasitansi kapasitor yang digunakan adalah . . . .
   a. 100 nF
   b. 10 nF
   c. 1 nF
   d. 0,1 nF
   e. 0,01 nF

10. Rangkaian seri RLC memiliki impedansi 100 ohm dengan resistor 40 ohm. Jika arus yang melalui rangkaian 100 mA, daya rata-rata pada rangkaian tersebut adalah . . . .
    a. 1 watt
    b. 0,5 watt
    c. 0,4 watt
    d. 0,3 watt
    e. 0,1 watt

B. ***Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!***

1. Sebuah penghantar *PQ* dengan panjang 20 cm memiliki hambatan 10 ohm. Penghantar tersebut bergerak memotong medan magnetik sebesar 0,5 wb/m^2 dengan kecepatan 2 m/s seperti pada gambar berikut.



   Tentukanlah:
   a. GGL induksi pada ujung penghantar,
   b. arah dan besar kuat arus pada kumparan.
2. Suatu generator menghasilkan arus sinusoidal dengan persamaan:

   $\varepsilon = 250 \sin 100\pi t$.

   Tentukanlah:
   a. GGL rata-rata,
   b. GGL efektif,
   c. frekuensi arus.
3. Sebuah trafo menurunkan tegangan AC dari 220 volt menjadi 110 volt. Jika efisinsi trafo = 80 %, dan daya keluaran 40 watt, berapakah arus masuk pada trafo tersebut?
4. Pada rangkaian seri RLC digunakan L = 10 mH, C = 1.000 μF, dan R = 100 ohm. Jika arus yang melalui rangkaian 100 V, 50 Hz, tentukanlah:
   a. impedansi rangkaian,
   b. daya rata-rata pada rangkaian.
5. Sebuah rangkaian seri RLC mempunyai resistansi, induktansi, dan kapasitansi sebesar 100 Ω; 2,5 H; dan 400 μF. Jika rangkaian dihubungkan dengan sumber tegangan $v = 10 \cos (25t)$, tentukan:
   a. impedansi rangkaian,
   b. beda fase antara tegangan dan arus.

Soal-soal Akhir Semester 1

A. *Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!*

1. Tali yang panjangnya 5 m ditegangkan dengan gaya 2 N, kemudian dirambati gelombang transversal. Jika cepat rambat gelombang itu 40 m/s, massa tali adalah . . . .
   a. 6,25 gram
   b. 6,50 gram
   c. 6,75 gram
   d. 6,85 gram
   e. 6,90 gram
2. Interferensi saling memperkuat terjadi apabila dua gelombang memiliki . . . .
   a. arah simpangan yang berlawanan
   b. fase yang berlawanan
   c. fase yang sama
   d. kecepatan yang sama
   e. panjang gelombang yang sama
3. Persamaan gelombang $y = 2 \sin 2\pi (4t + 2x)$ meter dengan t dalam sekon dan x dalam meter. Panjang gelombang dan kecepatan rambatnya adalah . . . .
   a. 0,5 m dan 0,5 m/s
   b. 0,5 m dan 1 m/s
   c. 0,5 m dan 2 m/s
   d. 1 m dan 0,5 m/s
   e. 2 m dan 1 m/s
4. Seutas tali panjangnya 220 cm digetarkan pada salah satu ujungnya sedang ujung lainnya terikat. Jika frekuensi gelombang 5 Hz dan cepat rambat gelombang 200 cm/s maka jarak simpul keenam dari titik asal adalah . . . .
   a. 20 cm
   b. 50 cm
   c. 100 cm
   d. 120 cm
   e. 200 cm
5. Di antara pernyataan berikut ini:
   1) mendeteksi kerusakan logam
   2) mengamati kerusakan jaringan-jaringan hidup manusia
   3) menentukan kedalaman laut
   4) menyembuhkan tumor

   Pernyataan yang merupakan contoh penggunaan gelombang ultrasonik pada kehidupan sehari-hari adalah . . . .
   a. 1) dan 2) saja
   b. 1) dan 3) saja
   c. 1), 2), dan 3)
   d. 2), 3), dan 4)
   e. 4) saja
6. Sebuah seruling yang memiliki kolom udara terbuka pada kedua ujungnya memiliki nada atas kedua dengan frekuensi 1.700 Hz. Jika kecepatan suara di udara adalah 340 m/s maka panjang seruling adalah . . . .
   a. 10 cm
   b. 15 cm
   c. 20 cm
   d. 25 cm
   e. 30 cm
7. Seseorang mendengarkan kembali suaranya sebagai gema dari sebuah tebing setelah waktu 4 sekon. Jika γ adalah perbandingan panas jenis udara pada tekanan dan suhu konstan, suhu saat itu T kelvin, dan massa molekul relatif udara adalah M maka persamaan cepat rambat gelombang tersebut adalah . . . .
   a. $\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$
   b. $\sqrt[2]{\frac{\gamma RT}{M}}$
   c. $\sqrt[4]{\frac{\gamma RT}{M}}$

d. $\sqrt[6]{\frac{\gamma RT}{M}}$

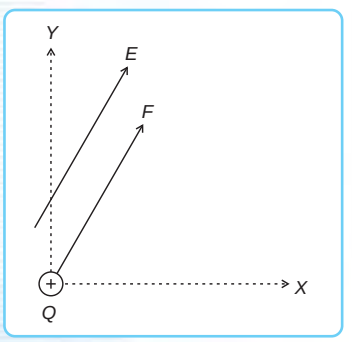
e. $\sqrt[8]{\frac{\gamma RT}{M}}$

8. Sebuah truk bergerak dengan kecepatan 36 km/jam di belakang sepeda motor. Pada saat truk mengeluarkan bunyi klakson dengan frekuensi 1.000 Hz, kecepatan sepeda motor adalah 72 km/jam. Jika kecepatan bunyi 340 m/s maka pengemudi sepeda motor akan mendengar klakson pada frekuensi . . . .
   a. 1.091 Hz
   b. 1.029 Hz
   c. 1.000 Hz
   d. 970 Hz
   e. 914 Hz
9. Taraf intensitas bunyi pada jarak 100 m dari sumber bunyi adalah 200 dB. Taraf intensitas bunyi tersebut pada jarak 1.000 m dari sumber bunyi adalah . . . .
   a. 2 dB
   b. 8 dB
   c. 10 dB
   d. 18 dB
   e. 22 dB
10. Kuat lemahnya suatu bunyi dipengaruhi oleh . . . .
   a. amplitudo
   b. frekuensi
   c. frekuensi dan amplitudo
   d. amplitudo dan jarak pendengar dari sumber bunyi
   e. frekuensi dan jarak pendengar dari sumber bunyi
11. Suatu celah sempit tunggal dengan lebar *a* disinari oleh cahaya monokromatis dengan panjang gelombang 5.890 Å. Lebar celah agar terjadi pola difraksi maksimum orde pertama pada sudut 30° adalah . . . .
   a. 5.890 Å
   b. 11.780 Å
   c. 17.670 Å
   d. 23.670 Å
   e. 29.450 Å
12. Pada percobaan interferensi Young digunakan cahaya dengan panjang gelombang 6.500 Å. Pola garis gelap terang dapat diamati pada layar yang berjarak 2 m dari celah. Jika jarak dua celah adalah 1 mm maka jarak antara gelap ketiga dan terang kelima adalah . . . .
   a. 1,6 mm
   b. 3,24 mm
   c. 5,1 mm
   d. 6,5 mm
   e. 9,74 mm
13. Sebuah seruling yang memiliki kolom udara terbuka pada kedua ujungnya memiliki frekuensi nada atas kedua dengan 5.100 Hz. Jika kecepatan suara di udara adalah 340 m/s maka panjang seruling mendekati . . . .
   a. 10 cm
   b. 15 cm
   c. 20 cm
   d. 25 cm
   e. 30 cm
14. Dua pelat logam besar dengan luas 1 m^2 saling berhadapan satu dengan lain. Jarak antara keduanya 5 cm dan keduanya membawa muatan yang sama tetapi berlainan pada permukaannya. Jika medan listrik antara kedua pelat 55 N/C, muatan pada pelat adalah . . . .
   a. $4{,}9 \times 10^{-20}$ Ns
   b. $4{,}9 \times 10^{-16}$ Ns
   c. $4{,}9 \times 10^{-12}$ Ns
   d. $4{,}9 \times 10^{-10}$ Ns
   e. $4{,}9 \times 10^{-8}$ Ns

15. Sebuah muatan listrik Q coulomb ditempatkan pada kapasitor C farad dengan beda potensial V volt sehingga menghasilkan tenaga potensial W joule. Jika beda potensial diubah menjadi $2V$ volt maka tenaga potensial yang dihasilkan adalah . . . joule.
    a. $\frac{1}{2}W$
    b. W
    c. $2W$
    d. $4W$
    e. $8W$
16. Dua muatan listrik masing-masing Q coulumb terpisah pada jarak r meter sehingga mengalami gaya tarik menarik sebesar F newton. Jika jarak kedua muatan tersebut diubah menjadi $2r$ meter maka gaya tarik menarik kedua muatan adalah . . . N.
    a. $\frac{1}{4}F$
    b. $\frac{1}{2}F$
    c. F
    d. $2F$
    e. $4F$
17. Sebuah kawat lurus yang panjang dialiri arus listrik 2 A. Besarnya induksi magnetik di titik yang berjarak 10 cm dari kawat tersebut adalah . . . .
    a. $1 \cdot 10^{-6}$ T
    b. $2 \cdot 10^{-6}$ T
    c. $3 \cdot 10^{-6}$ T
    d. $4 \cdot 10^{-6}$ T
    e. $8 \cdot 10^{-6}$ T
18. Sebuah penghantar berbentuk lingkaran berjari-jari 8 cm dialiri arus 5 A. Induksi magnetik di sumbu lingkaran yang berjarak 6 cm dari pusat lingkaran adalah . . . .
    a. $1{,}6\pi \cdot 10^{-7}$ T
    b. $3{,}2\pi \cdot 10^{-7}$ T
    c. $6{,}4\pi \cdot 10^{-7}$ T
    d. $8{,}0\pi \cdot 10^{-7}$ T
    e. $8{,}0\pi \cdot 10^{-6}$ T
19. Tongkat konduktor yang panjangnya 1 m berputar dengan kecepatan sudut tetap sebesar 10 rad/s di dalam medan magnetik seragam B = 0,1 T. Sumbu putar tongkat tersebut melalui salah satu ujung tongkat dan sejajar arahnya dengan arah garis-garis medan magnetik. Besar GGL induksi antara kedua ujung tongkat tersebut adalah . . . .
    a. 0,5 V
    b. 1,0 V
    c. 1,6 V
    d. 3,1 V
    e. 6,0 V
20. Sebuah hambatan 50 Ω, kapasitas 6 μF, dan induktor yang dihubungkan secara seri memiliki frekuensi resonansi $\frac{250}{\pi}$ Hz. Besar koefisien induksi diri induktor adalah . . . .
    a. 6 H
    b. 1,2 H
    c. 0,67 H
    d. 0,3 H
    e. 0,12 H
21. Tali yang panjangnya 2 m direntangkan sehingga mengalami tegangan 4 N. Tali tersebut kemudian digetarkan sehingga terbentuk gelombang stasioner. Jika massa tali tersebut 20 gram maka cepat rambat gelombangnya adalah . . . .
    a. 10 m/s
    b. 20 m/s
    c. 15 m/s
    d. 5 m/s
    e. 2 m/s
22. Seberkas cahaya mengenai permukaan kaca dengan sudut datang 30°. Jika indeks bias kaca tersebut 1,4 maka besar sudut biasnya adalah . . . .
    a. 21,9°
    b. 22,9°
    c. 23,9°
    d. 20,9°
    e. 19,9°

23. Jika taraf intensitas bunyi sebuah mesin dalam suatu ruangan adalah 45 dB maka taraf intensitas dari 20 buah mesin dalam satu ruangan adalah . . . .
    a. 50 dB
    b. 90 dB
    c. 58,01 dB
    d. 90,01 dB
    e. 116,02 dB

24. Sebuah muatan uji +15 μC diletakkan dalam suatu medan listrik. Jika muatan tersebut mengalami gaya 0,9 N yang membentuk sudut 30° terhadap sumbu *Y* positif maka kuat medan listriknya adalah . . . .



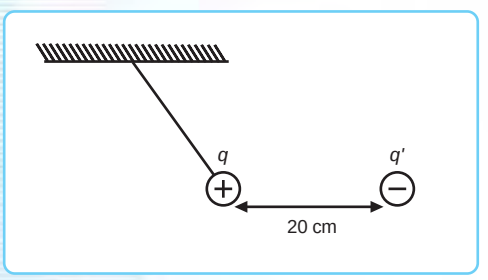
    a. $13{,}5 \cdot 10^4$ N/C
    b. $16{,}7 \cdot 10^4$ N/C
    c. $6 \cdot 10^4$ N/C
    d. $8{,}3 \cdot 10^4$ N/C
    e. $10 \cdot 10^4$ N/C

25. Dua buah kapasitor 1,5 F dan 5 F disusun seri dengan beda potensial 110 V. Energi yang tersimpan dalam rangkaian tersebut adalah . . . .
    a. 0 J
    b. $6{,}98 \cdot 10^{-1}$ J
    c. $6{,}98 \cdot 10^{-2}$ J
    d. $6{,}98 \cdot 10^{-3}$ J
    e. $6{,}98 \cdot 10^{-4}$ J

B. ***Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!***

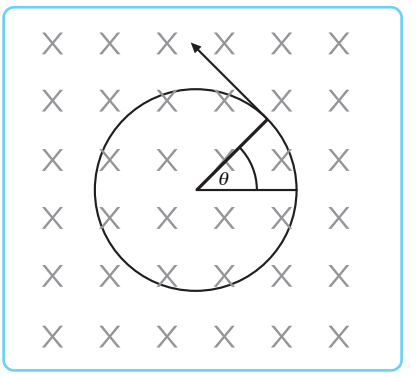
1. Seutas tali yang panjangnya 150 cm digetarkan naik turun pada salah satu ujungnya, sedangkan ujung lainnya bebas bergerak. Jika simpul keempat berjarak 30 cm dari titik asal getaran, tentukan:
    a. panjang gelombang,
    b. letak perut kelima dari sumber getar.
2. Dua celah sempit berjarak 1,2 mm disinari dengan sinar yang memiliki panjang gelombang 600 nm. Pola interferensi terjadi pada layar yang berjarak 2 m dari celah. Tentukan jarak garis terang ketiga dari terang pusat!
3. Sebuah mobil polisi bergerak dengan kecepatan 15 m/s mengejar perampok yang mengendarai sepeda motor dengan kecepatan 20 m/s. Polisi membunyikan sirine dengan frekuensi 1.000 Hz. Jika cepat rambat bunyi di udara 340 m/s, tentukan frekuensi sirine yang didengar perampok tersebut!
4. Dua muatan listrik yaitu $q_a = -4\ \mu$C dan $q_b = 9\ \mu$C terpisah pada jarak 20 cm. Di mana muatan $q_c = 2\ \mu$C harus diletakkan pada satu garis lurus q_a dan q_b agar gaya elektrostatis yang dialaminya adalah nol?
5. Sebuah rangkaian seri RLC terdiri atas $R = 200\ \Omega$, $L = 400$ mH, dan $C = 10\ \mu$F. Rangkaian tersebut dihubungkan pada sumber tegangan bolak-balik yang memiliki $V_m = 100\sqrt{2}$ volt dan $f = 50$ Hz. Tentukan daya rata-rata yang diserap rangkaian!
6. Seberkas cahaya polikromatik mempunyai spektrum cahaya ungu pada $\lambda = 450$ nm dan cahaya merah pada $\lambda = 700$ nm. Jika cahaya tersebut dikenakan pada kisi 200 garis/mm, tentukan:
    a. konstanta kisi,
    b. lebar sudut orde kedua yang dihasilkan kisi.

7. Seutas kawat yang massa jenisnya 0,4 kg/m direntangkan dengan gaya 0,025 N. Salah satu ujung kawat tersebut digetarkan dengan frekuensi 4 Hz dan amplitudo 0,01 m. Jika getaran menjalar ke kanan, tentukan persamaan gelombang pada tali tersebut!
8. Dua buah muatan masing-masing 10 μC terpisah pada jarak 5 cm. Jika kedua muatan diletakkan dalam bahan yang mempunyai permitivitas relatif 2, tentukan besar gaya yang bekerja pada kedua muatan tersebut!
9. Sebuah benda bermassa 20 gram dan bermuatan +2 μC digantungkan pada seutas tali yang massanya dapat diabaikan. Sebuah muatan -0,5 μC diletakkan 20 cm di sebelah kanan benda seperti pada gambar berikut.



Jika $k = 9 \cdot 10^9$ N.m^2/c^2 dan g = 10 m/s, tentukan besar tegangan pada tali dalam Newton!

10. Tongkat konduktor yang panjangnya 0,5 m berputar dengan kecepatan sudut tetap 20 rad/s di dalam medan magnetik 0,2 T. Sumbu putaran tersebut melalui salah satu ujung tongkat dan arah perputarannya searah dengan arah garis medan magnetik seperti gambar berikut.



Tentukan besar gaya gerak listrik induksi antara kedua ujung tongkat!

BAB
7

RADIASI BENDA HITAM

Gerbang

Gambar 7.1 Tukang las sedang mengerjakan pengelasan

Gambar di atas menunjukkan orang yang sedang mengelas besi. Ketika besi dilas terjadi perubahan warna pada bagian yang dilas. Besi tersebut mula-mula kemerahan dan warnanya terus bergeser ke arah warna putih seiring dengan semakin panasnya suhu pada bagian tersebut. Perubahan warna yang terjadi adalah radiasi yang dipancarkan besi pada suhu tinggi.

Adakah hubungan antara suhu benda dengan radiasi panas yang dipancarkannya? Mungkinkah sebuah benda memancarkan radiasi pada suhu yang rendah? Pada bab ini kita akan mempelajari lebih jauh tentang hubungan tersebut.

Kata kunci: Benda Hitam – Hukum Pergeseran Wien – Hipotesa Planck – Penerapan Radiasi Benda Hitam

A. Benda Hitam

Pernahkah kamu memakai baju warna gelap atau hitam pada siang hari yang panas? Apa yang kamu rasakan ketika memakai baju warna gelap atau hitam tersebut? Tentunya kamu akan cepat merasakan gerah bukan? Mengapa demikian?

Permukaan benda yang berwarna hitam akan menyerap kalor lebih cepat dari permukaan benda yang berwarna cerah. Hal inilah yang menyebabkan kita merasa lebih cepat gerah jika memakai baju berwarna gelap atau hitam pada siang hari. Sebaliknya, kita akan lebih nyaman memakai baju berwarna gelap atau hitam pada malam hari. Hal ini dikarenakan permukaan benda berwarna gelap atau hitam mudah memancarkan kalor daripada benda yang berwarna lain.

Jadi, benda yang permukaannya gelap atau hitam akan mudah menyerap kalor dan mudah pula memancarkannya. Untuk memahami sifat radiasi permukaan benda hitam, mari kita bahas bersama-sama uraian materi berikut ini!

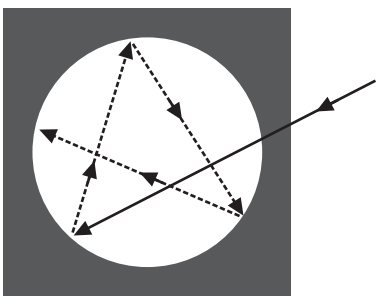
Pancaran cahaya pada benda yang dipanaskan disebut sebagai radiasi termal. Radiasi termal pada permukaan benda dapat terjadi pada suhu berapa pun. Radiasi termal pada suhu rendah tidak dapat kita lihat karena terletak pada daerah inframerah.

Selain dapat memancarkan radiasi, permukaan bahan juga dapat menyerap radiasi. Kemampuan bahan untuk menyerap radiasi tidak sama. Semakin mudah bahan menyerap radiasi, semakin mudah pula bahan itu memancarkan radiasi. Bahan yang mampu menyerap seluruh radiasi disebut sebagai benda hitam. Istilah benda hitam (*black body*) pertama kali dikenalkan oleh Fisikawan Gustav Robert Kirchhoff pada tahun 1862.

Benda Hitam

Benda hitam memancarkan radiasi dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Radiasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan benda hitam bergantung pada suhu benda hitam tersebut.

Ketika suhu permukaan benda hitam turun maka radiasi benda hitam bergeser ke arah intensitas yang lebih rendah dan panjang gelombangnya lebih panjang, demikian pula sebaliknya. Benda hitam adalah benda ideal yang sebenarnya tidak ada. Karakteristik benda hitam dapat didekati dengan menggunakan ruang tertutup berongga yang diberi sebuah lubang kecil. Perhatikan gambar 7.2 di samping!



Gambar 7.2 Model radiasi benda hitam

Setiap radiasi yang masuk ke rongga akan terperangkap oleh pemantulan bolak-balik. Hal ini menyebabkan terjadinya penyerapan seluruh radiasi oleh dinding rongga. Lubang rongga dapat diasumsikan sebagai pendekatan benda hitam. Jika rongga dipanaskan maka spektrum yang dipancarkan lubang merupakan spektrum kontinu dan tidak bergantung pada bahan pembuat rongga. Besarnya energi radiasi per satuan waktu per satuan luas permukaan disebut intensitas radiasi dan disimbolkan dengan *I*. Intensitas radiasi oleh benda hitam bergantung pada suhu benda. Berdasarkan hukum Stefan-Boltzmann, intensitas radiasi dinyatakan dengan persamaan:

$$I = e\,\sigma\,T^4 \qquad \ldots (7.1)$$

Keterangan:

I : intensitas radiasi (watt/m^2)

T : suhu mutlak benda (K)

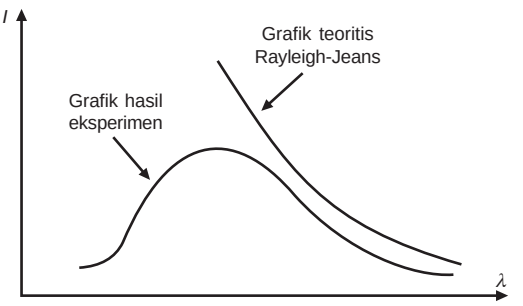
σ : konstanta Stefan-Boltzmann = $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ watt/m^2.K^4

e : koefisien emisivitas ($0 \leq e \leq 1$), untuk benda hitam $e = 1$

B. Hukum Pergeseran Wien

Pada subbab sebelumnya kita telah membahas radiasi benda hitam. Intensitas radiasi benda hitam berbanding lurus dengan pangkat empat dari suhu mutlaknya.

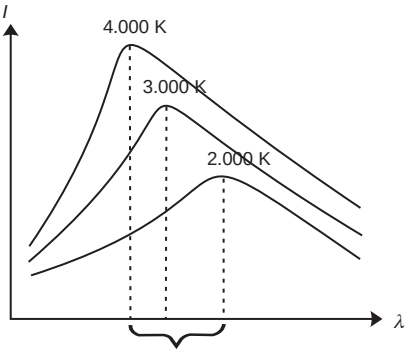
Spektrum radiasi benda hitam pada awalnya dipelajari oleh Rayleigh dan Jeans menggunakan pendekatan fisika klasik. Mereka meninjau radiasi dalam rongga bertemperatur *T* yang dindingnya merupakan pemantul sempurna sebagai sederetan gelombang elektromagnetik. Akan tetapi, pada suhu 2.000 K bentuk grafik hasil eksperimen berbeda dengan bentuk grafik yang dikemukakan Rayleigh dan Jeans, seperti ditunjukkan pada gambar 7.3.



Gambar 7.3 Perbandingan grafik $I - \lambda$ antara grafik Rayleigh-Jeans dan grafik hasil eksperimen

Rayleigh dan Jeans meramalkan bahwa benda hitam ideal pada kesetimbangan termal akan memancarkan radiasi dengan daya tak terhingga. Akan tetapi, ramalan Rayleigh dan Jeans tidak terbukti secara eksperimental. Ramalan ini dikenal sebagai bencana ultraungu.

Ilmuwan lain yang mempelajari spektrum radiasi benda hitam adalah Wilhelm Wien. Wien mempelajari hubungan antara suhu dan panjang gelombang pada intensitas maksimum. Perhatikan gambar 7.4 di samping!



Gambar 7.4 Intensitas energi radiasi benda hitam pada berbagai suhu

Puncak-puncak kurva pada grafik 7.4 menunjukkan intensitas radiasi pada tiap-tiap suhu. Dari gambar 7.4 tampak bahwa puncak kurva bergeser ke arah panjang gelombang yang pendek jika suhu semakin tinggi. Panjang gelombang pada intensitas maksimum ini disebut sebagai $\lambda_{maks.}$. Wien merumuskan hubungan antara suhu dan $\lambda_{maks.}$ sebagai berikut.

$$\lambda_{maks.} \cdot T = C \qquad \ldots (7.2)$$

Keterangan:

C : konstanta Wien ($2{,}878 \cdot 10^{-3}$ m.K)

Persamaan 7.2 dikenal sebagai hukum pergeseran Wien.

Hukum Pergeseran Wien

Agar lebih memahami materi di atas, simaklah contoh soal berikut ini kemudian kerjakan pelatihan di bawahnya!

Contoh Soal

Suatu permukaan logam dengan emisivitas 0,5 dipanaskan hingga 400 K. Tentukanlah:

a. intensitas energi radiasi yang dipancarkan, dan

b. panjang gelombang pada intensitas maksimumnya.

Penyelesaian:

Diketahui: $e = 0{,}5$

$T = 400$ K

$C = 2{,}878 \cdot 10^{-3}$ m.K

$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-3}$ Watt/m^2.K^4

Ditanyakan: a. $I = \ldots ?$

b. $\lambda_{maks.} = \ldots ?$

Jawab:

a. $I = 0{,}5 \cdot 5{,}67 \cdot 10^{-8} \cdot 400^4 = 725{,}76$ W/m^2

b. $\lambda_{maks.} = \dfrac{2{,}878 \cdot 10^{-3}}{400} = 7{,}195 \cdot 10^{-6}$ m

Kerja Mandiri

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

1. Jelaskan mengapa sepotong logam pada suhu tinggi berpijar cerah, tetapi sepotong kuarsa pada suhu yang sama hampir tidak berpijar!
2. Sepotong logam yang mempunyai emisivitas 0,3 dipanaskan hingga 500 K. Tentukan:
   a. intensitas radiasi yang dipancarkan, dan
   b. panjang gelombang pada intensitas maksimum.

C. Hipotesa Planck

Di awal pembahasan telah kita pelajari tentang teori spektrum radiasi benda hitam Rayleigh dan Jeans yang meramalkan intensitas yang tinggi pada panjang gelombang rendah (atau dikenal dengan ramalan bencana ultraungu). Ramalan bencana ultraungu dapat dipecahkan oleh teori Planck yang menganggap bahwa radiasi elektromagnetik dapat merambat hanya dalam paket-paket atau kuanta. Untuk lebih jelasnya, mari kita bahas hipotesa Planck berikut ini!

Pada tahun 1900 Max Planck mengemukakan teorinya tentang radiasi benda hitam yang sesuai dengan hasil eksperimen. Planck menganggap

bahwa gelombang elektromagnetik berperilaku sebagai osilator di rongga. Getaran yang ditimbulkan osilator kemudian diserap dan dipancarkan kembali oleh atom-atom. Planck sampai pada kesimpulan bahwa energi yang dipancarkan dan diserap tidaklah kontinu. Tetapi, energi dipancarkan dan diserap dalam bentuk paket-paket energi diskret yang disebut kuanta. Dengan hipotesanya, Planck berhasil menemukan suatu persamaan matematika untuk radiasi benda hitam yang benar-benar sesuai dengan data hasil eksperimennya. Persamaan Planck tersebut kemudian disebut hukum radiasi benda hitam Planck. Ia berpendapat bahwa ukuran energi kuantum sebanding dengan frekuensi radiasinya. Rumusannya adalah:

Hipotesa Planck

$$E = n \cdot h \cdot \upsilon \quad \ldots (7.3)$$

Keterangan:

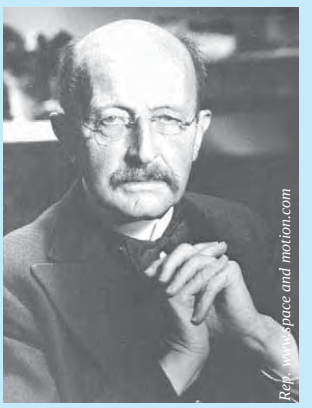
h : konstanta Planck ($6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J.s = $4{,}136 \cdot 10^{-15}$ eV.s)

n : bilangan kuantum (n = 0, 1, 2, . . ., n)

υ : frekuensi radiasi (Hz)

Kuantisasi energi osilator ini merupakan hal baru pada masa itu. Kuantisasi energi inilah yang mendasari teori fisika kuantum.

Sebaiknya Tahu



Gambar 7.5 Max Planck

Max Planck (1858–1947)

Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858–1947) adalah fisikawan Jerman pemenang hadiah nobel bidang fisika dalam teorinya yang terkenal sebagai teori kuantum. Ia lahir di Keil pada tanggal 23 April 1857.

D. Penerapan Radiasi Benda Hitam

Setelah kita membahas konsep radiasi benda hitam, kali ini kita akan mempelajari penerapannya. Dengan menggunakan prinsip radiasi benda hitam, kita dapat menentukan daya yang dipancarkan oleh matahari, suhu matahari, dan radiasi yang dipancarkan oleh tubuh manusia.

1. Penentuan Suhu Permukaan Matahari

Suhu permukaan matahari atau bintang dapat ditentukan dengan mengukur daya radiasi matahari yang diterima bumi. Dengan menggunakan hukum Stefan-Boltzmann, total daya yang dipancarkan oleh matahari adalah:

$$P_M = I \cdot A \quad \ldots (7.4)$$

Jika diketahui:

$I = e \cdot \sigma \cdot T_M^4$

A = luas permukaan matahari = $4\pi R_M$

$e = 1$

maka $P_M = (\sigma T_M^4)(4\pi R_M^2)$ . . . (7.5)

Matahari memancarkan daya yang sama ke segala arah. Dengan demikian bumi hanya menyerap sebagian kecil, yaitu:

$$P_{abs} = P_M \left(\frac{\pi R_B^2}{4\pi D^2}\right) = \left(\sigma T_M^4\right)\left(4\pi R_M^2\right)\left(\frac{\pi R_B^2}{4\pi D^2}\right) \quad \ldots (7.6)$$

Keterangan:

P_M : daya yang dipancarkan matahari (watt)
T_M : suhu permukaan matahari (K)
R_M : jari - jari matahari (m)
σT_M^4 : laju radiasi matahari (watt/m^2)
P_{abs} : daya yang diserap bumi (watt)
R_B : jari-jari bumi (m)
D : jarak matahari ke bumi (m)

Meskipun bumi hanya menyerap sebagian daya dari matahari, namun bumi mampu memancarkan daya ke segala arah. Besar daya yang dipancarkan bumi adalah:

$$P_{emt} = (\sigma T_B^4)(4\pi R_B^2) \quad \ldots (7.7)$$

Keterangan:

P_{emt} : daya yang dipancarkan bumi (watt)
T_B : suhu permukaan bumi (K)

Misalnya bumi berada dalam kesetimbangan termal maka daya yang diserap bumi sama dengan daya yang dipancarkan. Dengan demikian suhu permukaan matahari adalah:

$$P_{abs} = P_{emt}$$

$$(\sigma T_M^4)(4\pi R_M^2)\left(\frac{\pi R_B^2}{4\pi D^2}\right) = (\sigma T_B^4)(4\pi R_B^2)$$

$$T_M^4 \cdot \left(\frac{R_M^2}{D^2}\right) = 4T_B^4$$

$$T_M^4 = T_B^4 \left(\frac{4D^2}{R_M^2}\right)$$

$$T_M = T_B \sqrt{\frac{2D}{R_M}} \quad \ldots (7.8)$$

2. Radiasi Energi yang Dipancarkan Manusia

Penerapan radiasi benda hitam juga dapat diterapkan pada benda-benda yang tidak berada dalam kesetimbangan radiasi. Sebagian besar energi manusia diradiasikan dalam bentuk radiasi elektromagnetik, khususnya inframerah. Untuk dapat memancarkan suatu energi, tubuh manusia harus menyerap energi dari lingkungan sekitarnya. Total energi yang dipancarkan oleh manusia adalah selisih antara energi yang diserap dengan energi yang dipancarkan.

$$P_T = P_{pancar} - P_{serap}$$

Dengan memasukkan hukum Stefan-Boltzmann diperoleh total energi yang dipancarkan manusia sebagai berikut.

$$P_T = \sigma A\, e\, (T^4 - T_0^4) \quad \ldots (7.9)$$

Keterangan:

T : suhu permukaan tubuh manusia (K)

T_0 : suhu lingkungan (K)

A : luas permukaan tubuh manusia (m^2)

Agar lebih memahami penerapan radiasi benda hitam, pelajarilah dengan saksama contoh soal di bawah ini!

Contoh Soal

Cahaya matahari sampai ke bumi dengan laju 73.400 kW/m^2. Tentukan berapa suhu permukaan matahari!

Penyelesaian:

Diketahui: $V_p = 73.400\ kW/m^2 = 7{,}34 \cdot 10^7\ W/m^2$

$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ W/m^2.K^4$

Ditanyakan: $T_M = \ldots ?$

Jawab:

$$V_p = \sigma T_M^4$$

$$T_M = \left(\frac{V_P}{\sigma}\right)^{\frac{1}{4}}$$

$$T_M = \left(\frac{7{,}34 \cdot 10^7}{5{,}67 \cdot 10^{-8}}\right)^{\frac{1}{4}}$$

$$T_M = 5.998\ K \approx 6.000\ K$$

$$T_M = 6.000\ K$$

Setelah mempelajari materi dan contoh soal di atas, cobalah menguji pemahamanmu dengan mengerjakan pelatihan berikut ini!

Kerja Berpasangan

Kerjakan bersama teman sebangkumu!

1. Bagian tercerah dari bintang Sirius terletak pada panjang gelombang 2.900 Å. Berapakah suhu permukaan bintang tersebut?
2. Tentukan suhu permukaan matahari yang memancarkan radiasi dengan panjang gelombang 5.700 Å dan 5.900 Å!

3. Dua buah bintang A dan B mempunyai perbandingan jari-jari 2:3. Jika perbandingan jarak bintang terhadap bumi adalah 2:1, tentukan:
   a. perbandingan daya yang dipancarkan kedua bintang, dan
   b. perbandingan suhu kedua bintang.

Rangkuman

1. Intensitas radiasi oleh benda hitam bergantung pada suhu benda dan dirumuskan berdasarkan hukum Stefan-Boltzman berikut.

   $I = \sigma T^4$

2. Panjang gelombang pada intensitas maksimum yang dipancarkan suatu benda berbanding terbalik dengan suhunya. Secara matematis dapat dituliskan:

   $\lambda_{maks.} \cdot T = C$

3. Energi gelombang elektromagnetik tidak bersifat kontinu tetapi dipancarkan dan diserap dalam bentuk paket-paket energi diskret yang disebut kuanta dan besarnya dinyatakan sebagai:

   $E = n \cdot h \cdot \upsilon$

4. Suhu permukaan matahari dapat ditentukan dengan rumus berikut.

   $T_M = T_B \sqrt{\frac{2D}{R_M}}$

5. Radiasi energi yang dipancarkan oleh manusia adalah:

   $P_T = \sigma A e (T^4 - T_0^4)$

Soal-soal Uji Kompetensi

A. *Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!*

1. Suatu lempengan logam dipanaskan hingga 500 K. Jika konstanta Wien besarnya $2{,}878 \cdot 10^{-3}$ mK maka panjang gelombang pada intensitas maksimum yang dipancarkan logam tersebut adalah . . . .
   a. $5{,}76 \cdot 10^{-6}$ m
   b. $6{,}76 \cdot 10^{-6}$ m
   c. $7{,}76 \cdot 10^{-6}$ m
   d. $8{,}76 \cdot 10^{-6}$ m
   e. $9{,}76 \cdot 10^{-6}$ m

2. Sebatang logam mempunyai emisivitas 0,4. Intensitas radiasi yang dipancarkan logam tersebut pada suhu 450 K adalah . . . .
   a. 580,5 W/m^2
   b. 580,6 W/m^2
   c. 580,7 W/m^2
   d. 586,5 W/m^2
   e. 586,0 W/m^2

3. Jika sebuah logam memancarkan intensitas radiasi 219,5 W/m^2 pada suhu 100 °C maka emisivitas logam tersebut adalah . . . .
   a. 0,1
   b. 0,3
   c. 0,5
   d. 0,2
   e. 0,4
4. Panjang gelombang maksimum yang dipancarkan sebuah logam pada intensitas maksimumnya adalah $4 \cdot 10^{-6}$ m. Logam tersebut dipanaskan pada suhu . . . .
   a. 719,5 K
   b. 720 K
   c. 718,5 K
   d. 718 K
   e. 719 K
5. Sebuah elektron berpindah dari $n = 1$ ke $n = 3$ dengan memancarkan frekuensi 12 MHz. Energi yang diperlukan oleh elektron adalah . . . .
   a. $7{,}59 \cdot 10^{-24}$ J
   b. $7{,}59 \cdot 10^{-25}$ J
   c. $7{,}59 \cdot 10^{-26}$ J
   d. $7{,}59 \cdot 10^{-27}$ J
   e. $7{,}59 \cdot 10^{-28}$ J
6. Laju radiasi matahari yang suhu permukaannya 4.500 K adalah . . . .
   a. 25,23 kW/m^2
   b. 25,23 MW/m^2
   c. 22,35 MW/m^2
   d. 23,25 kW/m^2
   e. 23,25 MW/m^2
7. Jarak bumi dengan suatu bintang yang berjari-jari $2 \cdot 10^3$ m adalah $4 \cdot 10^{19}$ m. Jika suhu permukaan bumi 300 K maka suhu permukaan bintang tersebut adalah . . . .
   a. $6 \cdot 10^4$ K
   b. $6 \cdot 10^5$ K
   c. $16 \cdot 10^4$ K
   d. $16 \cdot 10^5$ K
   e. $1{,}5 \cdot 10^5$ K
8. Seseorang mempunyai emisivitas 0,3 dan luas permukaan 1,75 m^2. Jika suhu orang tersebut 309 K dan suhu lingkungan 295 K maka radiasi yang dipancarkan orang tersebut adalah . . . .
   a. 4,593 W/m^2
   b. 4,593 kW/m^2
   c. 45,93 MW/m^2
   d. 45,93 kW/m^2
   e. 4,593 W/m^2

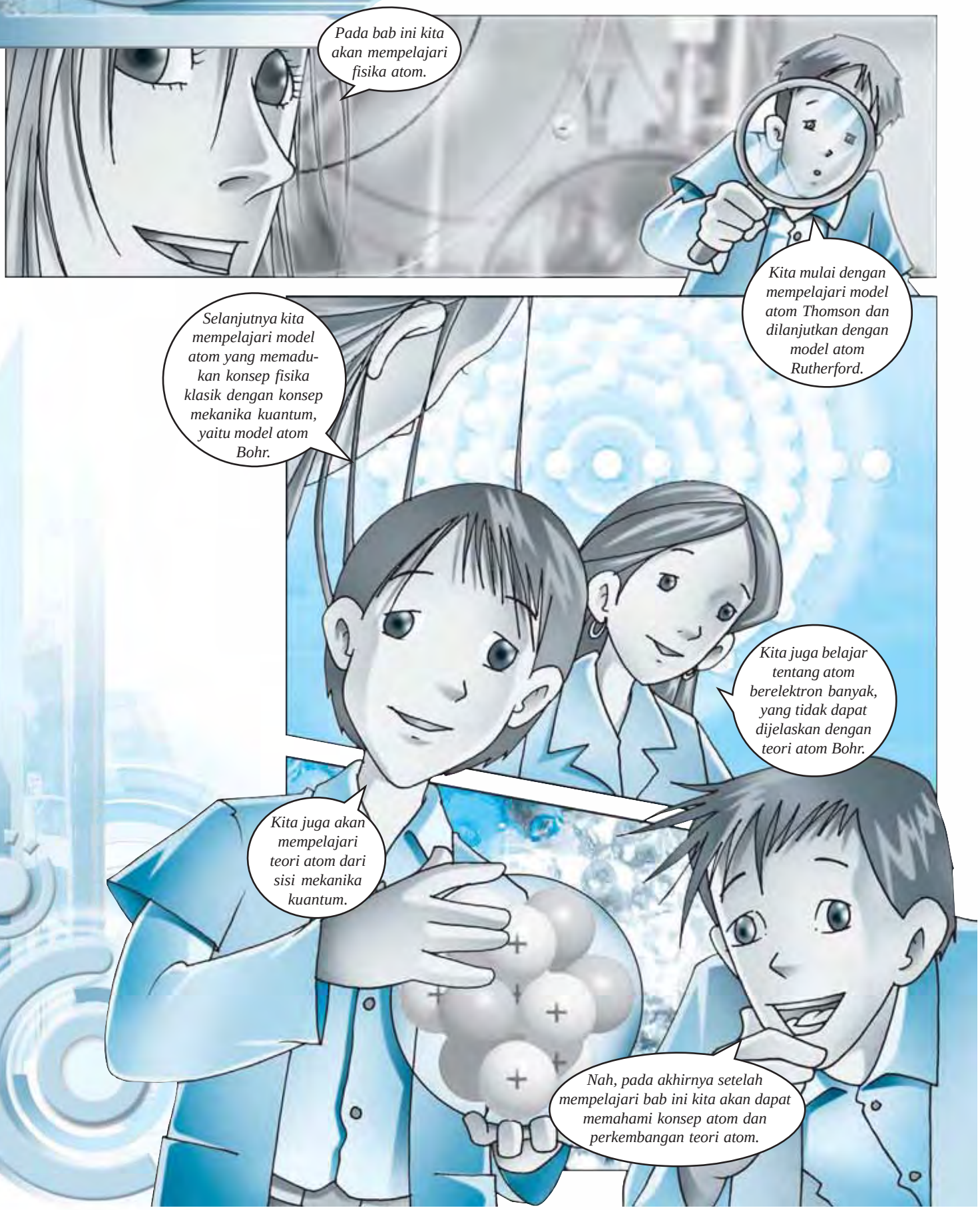
B. *Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!*

1. Jika matahari dianggap sebagai benda hitam dengan suhu permukaan (fotosfer) sebesar 5.000 K, tentukanlah energi radiasi yang dipancarkan matahari per satuan luas permukaannya tiap sekon!
2. Suatu logam dipanaskan hingga intensitas panjang gelombang maksimumnya berada pada daerah cahaya tampak dengan panjang gelombang 4.000 angstrom. Jika konstanta Wien sama dengan $2{,}878 \cdot 10^{-3}$ mK, tentukanlah suhu permukaan logam tersebut!
3. Sebuah logam yang mempunyai emisivitas 0,6 dipanaskan hingga suhu 750 K. Tentukan:
   a. intensitas radiasi yang dipancarkan, dan
   b. panjang gelombang pada intensitas maksimum.
4. Dua bintang *X* dan *Y* mempunyai perbandingan jari-jari 4 : 3. Jika perbandingan jarak bintang terhadap bumi adalah 1 : 3, tentukan:
   a. perbandingan daya yang dipancarkan kedua bintang, dan
   b. perbandingan suhu kedua bintang.
5. Seseorang yang mempunyai luas permukaan 1,6 m^2 memancarkan radiasi sebesar 20 W/m^2. Jika suhu tubuh orang tersebut 309 K dan suhu lingkungan 293 K, berapakah emisivitas orang tersebut?

BAB

8

FISIKA ATOM



Gerbang

Gambar 8.1 Serpihan kapur

Ambillah sepotong kapur kemudian potonglah menjadi dua! Selanjutnya, potongan tersebut potong lagi menjadi dua, demikian seterusnya. Dapatkah kamu membaginya terus-menerus dengan bantuan alat yang paling teliti sekalipun? Mungkin seperti itulah awal pertanyaan manusia tentang hakikat suatu partikel yang kemudian dikenal dengan atom. Apakah atom itu? Pada bab ini kita akan mempelajari teori atom tersebut.

Kata Kunci: Teori Atom – Model Atom Thomson, Rutherford, Bohr – Spektrum Atom Hidrogen

A. Atom

Teori Atom

Teori atom mengalami perkembangan dari masa ke masa. Istilah atom pertama kali diperkenalkan oleh filsuf Yunani bernama Demokritus. Atom berasal dari kata ”atomos” yang berarti tidak dapat dibagi. Atom terdiri atas proton dan neutron serta sejumlah elektron pada jarak yang agak jauh.

Muncullah anggapan bahwa elektron berputar mengelilingi inti sebagaimana planet mengelilingi matahari. Tetapi, anggapan ini ditolak oleh teori elektromagnetik klasik. Alasannya adalah anggapan di atas bertentangan dengan keberadaan orbit yang mantap.

Untuk mengatasi kesulitan ini Neils Bohr pada tahun 1913 mengajukan gagasannya untuk memudahkan gambaran perilaku atom. Meskipun mengandung beberapa kelemahan, Neils Bohr memberikan sumbangan yang berarti bagi perkembangan teori atom (lihat pembahasannya pada halaman 135). Sejak akhir abad ke-19 hingga awal abad ke-20 teori atom mengalami perkembangan yang sangat pesat, seiring semakin meningkatnya rasa keingintahuan manusia tentang hakikat atom. Tinjauan atom tidak lagi melalui tinjauan intuitif dan teoritis, tetapi sudah melalui proses pengamatan empiris dan dukungan tinjauan matematis yang hasilnya sangat mengagumkan.

B. Sinar Katode dan Model Atom Thomson

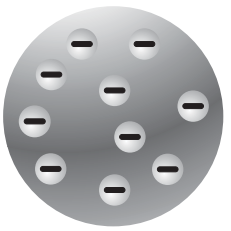
Pada akhir abad ke-19 para ahli melakukan penelitian tentang aliran listrik di dalam tabung yang dilengkapi dengan dua elektrode yang terpisah satu sama lain dan dihubungkan dengan beda potensial 10.000 volt. Perhatikan gambar 8.2 di bawah! Elektrode yang terhubung dengan kutub positif disebut anode, sedangkan yang terhubung dengan kutub negatif disebut katode. Tabung ini juga dilengkapi dengan pemompa udara keluar sehingga tekanan udara dapat diatur.

Gambar 8.2 Tabung sinar katode

Ketika tekanan udara di dalam tabung sama dengan tekanan udara luar, pada rangkaian tidak terjadi aliran listrik. Jika tekanan udara di dalam tabung dikurangi sedikit demi sedikit, pada rangkaian terjadi aliran listrik yang disertai nyala sinar. Jika tekanan udara di dalam tabung mendekati hampa maka tabung yang dilapisi seng sulfida (ZnS) akan berpendar. Berpendarnya ZnS disebabkan oleh sinar tidak tampak yang memancar dari katode. Sinar ini dikenal sebagai sinar katode. Penerapan sinar katode banyak digunakan pada layar televisi, layar komputer, CRO (*Oscilloscope*), dan layar radar. Sifat sinar katode adalah sebagai berikut.

1. Sinar katode merambat menurut garis lurus.
2. Memendarkan seng sulfida dan barium platinasianida.
3. Terdiri atas partikel-partikel bermuatan negatif.
4. Menghasilkan panas.
5. Menghitamkan pelat foto.
6. Menyimpang dalam medan magnetik.
7. Menyimpang dalam medan listrik.
8. Menghasilkan sinar–X.

Penemuan sinar katode menarik perhatian para ilmuwan, salah satunya adalah Sir Joseph John Thomson. Thomson kemudian mengembangkan penelitian tentang sinar katode. Penelitian sinar katode oleh Thomson dilakukan dengan menggunakan tabung yang dilengkapi medan listrik dan medan magnetik. Berdasarkan hasil penelitiannya, Thomson menyatakan bahwa sinar katode adalah partikel bermuatan negatif yang bergerak dari katode menuju anode. Partikel ini selanjutnya disebut elektron. Penelitian yang dilakukan oleh Thomson tersebut membawanya pada teori tentang model atom.



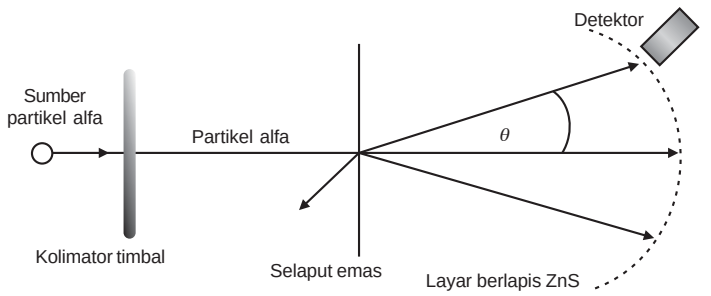
Gambar 8.3 Model atom Thomson

Thomson mengajukan hipotesis bahwa atom merupakan bola homogen bermuatan positif dengan elektron yang bermuatan negatif tersebar di dalamnya. Perhatikan gambar 8.3 di samping! Model atom yang diajukan Thomson menyerupai kue kismis, sehingga model atom Thomson dikenal sebagai model atom kue kismis.

Model Atom Thomson

C. Model Atom Rutherford

Model atom Thomson masih memerlukan pengujian secara eksperimental. Pada tahun 1911 Hans William Geiger dan Ernest Marsden di bawah pengawasan Ernest Rutherford melakukan percobaan hamburan sinar alfa untuk menguji kebenaran hipotesis Thomson. Mereka menggunakan pemancar partikel alfa di belakang layar timbal yang berlubang kecil sehingga dihasilkan berkas partikel alfa yang tajam. Berkas ini diarahkan pada selaput emas tipis. Pada sisi lain dipasang layar berlapis seng sulfida (ZnS) yang dapat berpendar bila tertumbuk partikel alfa. Perhatikan gambar 8.4 berikut!

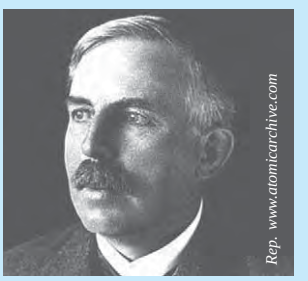


Gambar 8.4 Bagan percobaan partikel alfa yang dilakukan oleh Geiger dan Marsden

Jika model atom Thomson benar maka partikel alfa akan mudah menembus atom-atom bahan selaput emas. Hasil eksprimen tersebut menunjukkan bahwa sebagian partikel alfa dihamburkan dengan sudut hamburan yang cukup besar, bahkan ada yang terpantul. Sebagian besar partikel alfa lainnya diteruskan tanpa hamburan. Hasil ini menunjukkan bahwa model atom Thomson tidak benar.

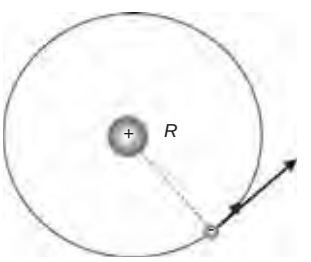
Berdasarkan hasil percobaan tersebut Rutherford mengemukakan model atom lain. Rutherford menyatakan bahwa atom terdiri atas inti bermuatan positif dan elektron yang bergerak mengelilinginya. Model atom Rutherford ditunjukkan pada gambar 8.6 di samping.

Sebaiknya Tahu



Gambar 8.5 Ernest Rutherford

Ernest Rutherford lahir di Selandia Baru pada tahun 1871. Ia mendapatkan penghargaan hadiah Nobel di bidang kimia pada tahun 1919. Penemuannya yang penting adalah mengenai hamburan sinar alfa oleh selaput logam, serta peluruhan inti nitrogen menjadi inti oksigen dengan melepaskan proton.



Gambar 8.6 Model atom Rutherford

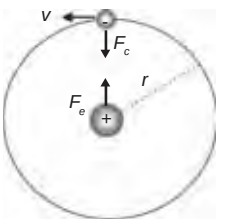
Ada dua kelemahan pada model atom Rutherford meskipun Rutherford dapat menjelaskan hasil percobaannya.

1. Rutherford menyatakan bahwa elektron bergerak mengelilingi inti atom. Berdasarkan teori elektrodinamika elektron seharusnya memancarkan gelombang elektromagnetik. Akibatnya elektron kehilangan energi sehingga lintasannya semakin lama semakin kecil dan akhirnya menempel pada inti. Kenyataannya elektron tidak pernah jatuh ke inti.
2. Rutherford tidak dapat menjelaskan spektrum atom hidrogen yang bersifat diskret. Menurut teori Rutherford, spektrum atom seharusnya bersifat kontinu.

D. Model Atom Bohr

Pada tahun 1913 Neils Bohr (1885–1962) mengemukakan model atom yang memadukan konsep fisika klasik seperti yang dikemukakan oleh Rutherford dengan konsep mekanika kuantum Planck dan Einstein.

Neils Bohr mengemukakan bahwa atom ternyata menyerupai sistem tata surya mini dengan elektron-elektron mengitari inti atom seperti planet mengitari matahari. Jika sistem tata surya tidak runtuh karena tarikan gravitasi antara matahari dengan tiap planet maka atom juga tidak runtuh karena gaya elektrostatik (gaya Coulomb) antara inti dan tiap elektron. Model atom yang dikemukakan Bohr dilandasi oleh dua postulat.



Gambar 8.7 Pendekatan fisika klasik untuk menentukan kecepatan elektron

1. Elektron dapat mengelilingi inti tanpa harus memancarkan gelombang elektromagnetik jika berada dalam orbit yang memiliki kelipatan bulat panjang gelombang elektron.

   Kita tinjau elektron yang berada pada orbit di sekitar inti hidrogen. Perhatikan gambar 8.7 di samping! Kecepatan elektron pada orbit kita dekati dengan konsep fisika klasik berikut.

$$F_{\text{sentripetal}} = F_{\text{coulomb}}$$

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{r^2}$$

$$v^2 = \frac{e^2}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0 mr}}$$

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0 mr}} \quad \ldots (8.1)$$

Panjang gelombang elektron menurut De Broglie adalah:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad \ldots (8.2)$$

Dengan memasukkan persamaan 8.1 ke persamaan 8.2 serta memasukkan jari-jari lintasan elektron atom hidrogen sebesar $5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m kita peroleh:

$$\lambda = \frac{h}{e}\sqrt{\frac{4\pi\varepsilon_0 r}{m}} \quad \ldots (8.3)$$

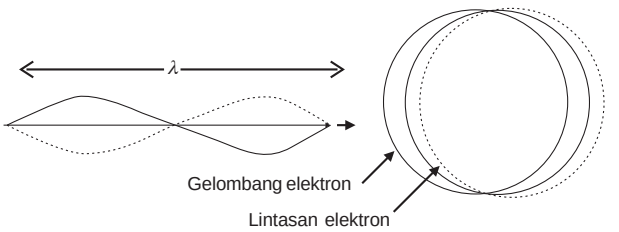
$$\lambda = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}}{1{,}602 \cdot 10^{-19}}\sqrt{\frac{4\pi(8{,}85 \cdot 10^{-12})5{,}3.10^{-11}}{9{,}1 \cdot 10^{31}}}$$

$\lambda = 33 \cdot 10^{-11}$ m

Panjang gelombang tersebut ternyata sama dengan keliling orbit elektron yaitu:

$2\pi r = 33 \cdot 10^{-11}$ m

Hal ini dapat diamati pada gambar 8.8 berikut.



Gambar 8.8 Lintasan elektron untuk $\lambda = 2\pi r$

Syarat kemantapan orbit elektron akan terpenuhi jika:

$$n\lambda = 2\pi r_n \quad \ldots (8.4)$$

Keterangan:

λ : panjang gelombang elektron (m)

r_n : jari-jari orbit yang mengandung n panjang gelombang (m)

n : bilangan kuantum

Jika persamaan 8.3 kita substitusikan ke persamaan 8.4 maka akan kita peroleh:

$$r_n = \frac{n^2 h^2 \varepsilon_0}{\pi m e^2} \quad \ldots (8.5)$$

Jari-jari orbit terdalam disebut jari-jari Bohr dan dinyatakan sebagai a_o. Dari persamaan 8.5 besarnya jari-jari Bohr dapat ditentukan sebagai berikut.

$a_o = r_1 = 5{,}292 \cdot 10^{-11}$m

Sedangkan jari-jari orbit lain dapat kita nyatakan:

$$r_n = n^2 a_o \quad \ldots (8.6)$$

Untuk lebih jelasnya, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal

Tentukan jari-jari orbit dari kecepatan elektron yang berada pada $n = 3$!

Penyelesaian:

Diketahui: $n = 3$

$e_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ F/m

$m_e = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg

$a_0 = 5{,}292 \cdot 10^{-11}$ m

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

Ditanyakan: $r_3 = \ldots ?$

$v = \ldots ?$

Jawab:

$r_3 = n^2 a_0 = 3^2 \cdot 5{,}292 \cdot 10^{-11} = 9 \cdot 5{,}292 \cdot 10^{-11} = 47{,}628 \cdot 10^{-11}$ m

$$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0 m r}}$$

$$v = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}}{\sqrt{4\pi (8{,}85 \cdot 10^{-12})(9{,}1 \cdot 10^{-31})(47{,}628 \cdot 10^{-12})}}$$

$$v = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19}}{\sqrt{48176{,}655 \cdot 10^{-55}}}$$

$$v = \frac{1{,}69 \cdot 10^{-19}}{6{,}96 \cdot 10^{-26}}$$

$v = 0{,}24 \cdot 10^7$

$v = 24 \cdot 10^5$ m/s

2. Elektron berpindah dari satu orbit ke orbit lain dengan memancarkan atau menyerap energi. Jika elektron berpindah ke tingkat energi yang lebih rendah, elektron akan memancarkan foton. Sebaliknya, jika elektron berpindah ke orbit yang lebih tinggi, elektron akan menyerap energi. Setiap orbit bersesuaian dengan energi elektron yang berbeda-beda. Energi (E_n) yang bersesuaian dengan jari-jari orbit (r_n) disebut tingkat energi.

Besarnya energi elektron dinyatakan sebagai berikut.

$$E_n = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n} \quad \ldots (8.7)$$

Jika persamaan 8.5 disubstitusikan pada persamaan 8.7, kita peroleh:

$$E_n = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\left(\frac{1}{n^2}\right) = \frac{E_1}{n^2} \quad \ldots (8.8)$$

E_1 adalah tingkat energi terendah yang juga disebut keadaan dasar dari atom tersebut. Untuk atom hidrogen besarnya adalah -13,6 eV. Sedangkan E_2, E_3, E_4, . . . E_n disebut keadaan eksitasi. Saat $n = \infty$, harga $E_\infty = 0$. Pada keadaan ini elektron tidak lagi terikat oleh inti atom.

Energi yang diperlukan untuk membebaskan elektron dari atom disebut energi ionisasi. Besarnya energi ionisasi pada atom hidrogen adalah 13,6 eV. Energi kinetik suatu elektron dapat diketahui dengan menggunakan rumus berikut.

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot \boldsymbol{v}^2 = \frac{1}{2} \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n}$$

Energi potensial listrik suatu elektron dapat ditentukan dengan rumus berikut.

$$E_p = (-e) \cdot \left(\frac{e}{8\pi\varepsilon_0 r_n} \right) = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r_n}$$

Sekarang kita tinjau transisi elektron pada atom hidrogen dari keadaan awal (E_i) ke keadaan akhir (E_f). Besarnya energi foton yang diserap atau dilepas pada peristiwa ini dinyatakan sebagai:

$$E_i - E_f = E_1 \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) = E_1 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad \text{. . . (8.9)}$$

dengan $E_1 = -13{,}6$ eV dan 1 eV = $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ joule.

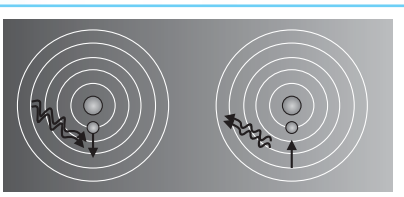
Dari konsep foton kita dapatkan bahwa besarnya energi foton dinyatakan sebagai:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Dengan demikian panjang gelombang foton yang dipancarkan atau diserap pada transisi elektron tersebut adalah:

$$\frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{ch} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad \text{. . . (8.10)}$$

Gambar 8.9 menunjukkan transisi elektron pada atom hidrogen.



(a) (b)

Gambar 8.9 (a) Transisi elektron dari keadaan rendah ke tinggi dengan menyerap energi dan (b) transisi elektron dari keadaan tinggi ke rendah dengan melepas energi

Agar kamu lebih memahami materi di atas, simaklah contoh soal berikut kemudian kerjakan pelatihan di bawahnya!

Contoh Soal

Tentukanlah energi yang dilepas dan panjang gelombang foton yang dipancarkan elektron ketika bertransisi dari keadaan n = 3 ke keadaan dasar!

Penyelesaian:

Diketahui: $n_i = 3$

$n_f = 1$

Ditanyakan: ΔE = . . .?

λ = . . .?

Jawab:

Energi yang dilepas foton:

$$\Delta E = -13{,}6\left(\frac{1}{9} - \frac{1}{1}\right) = 12{,}09 \text{ eV} = 1{,}93 \cdot 10^{-18} \text{ joule}$$

Panjang gelombang foton:

$$\lambda = -\frac{ch}{\Delta E} = \frac{3 \cdot 10^{8} \cdot 6{,}6 \cdot 10^{-34}}{1{,}93 \cdot 10^{-18}} = 1{,}03 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 103 \text{ nm}$$

Kerja Mandiri

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

1. Sebut dan jelaskan kelemahan teori model atom Thomson dan Rutherford!
2. Tentukan energi yang dilepas dan panjang gelombang foton yang dipancarkan elektron ketika bertransisi dari:
   a. n = 2 ke n = 1, dan
   b. n = 4 ke n = 1.

E. Spektrum Atom Hidrogen

Radiasi foton yang dipancarkan elektron atom hidrogen yang bertransisi (tereksitasi) hanya memiliki panjang gelombang tertentu. Panjang gelombang ini bergantung pada keadaan awal dan keadaan akhir elektron atau dengan kata lain bergantung pada bilangan kuantum awal (n_i) dan akhir (n_f). Berdasarkan keadaan ini terdapat lima deret spektrum hidrogen, yaitu:

1. Deret Lyman

Deret Lyman merupakan deret ultraviolet. Deret Lyman terjadi jika elektron berpindah dari lintasan luar menuju lintasan $n = 1$. Secara matematis panjang gelombang deret Lyman dirumuskan:

$$\frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{ch}\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \quad \ldots \ (8.11)$$

Keterangan:

$n_i = 2, 3, 4, \ldots$

2. Deret Balmer

Deret Balmer merupakan deret cahaya tampak. Deret Balmer terjadi jika elektron berpindah dari lintasan luar menuju lintasan $n = 2$. Panjang gelombang deret Balmer dapat ditentukan dengan rumus berikut.

$$\frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{ch}\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \quad \ldots \ (8.12)$$

Keterangan:

$n_i = 3, 4, 5, \ldots$

3. Deret Paschen

Deret Paschen merupakan deret sinar inframerah pertama. Deret Paschen terjadi ketika elektron berpindah dari lintasan luar menuju lintasan $n = 3$. Panjang gelombang deret Paschen dirumuskan:

$$\frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{ch}\left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \quad \ldots \ (8.13)$$

Keterangan:

$n_i = 4, 5, 6, \ldots$

4. Deret Brackett

Deret Brackett merupakan deret inframerah kedua. Deret ini terjadi saat elektron berpindah dari lintasan luar ke lintasan $n = 4$. Panjang gelombang deret Brackett adalah:

$$\frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{ch}\left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \quad \ldots \ (8.14)$$

Keterangan:

$n_i = 5, 6, 7, \ldots$

5. Deret Pfund

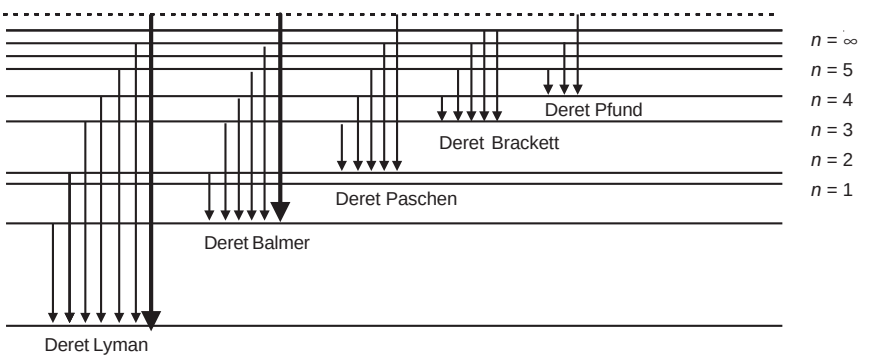
Deret Pfund merupakan deret inframerah ketiga. Deret Pfund terjadi jika elektron dari lintasan luar berpindah ke lintasan $n = 5$. Panjang gelombang deret ini ditentukan dengan rumus:

$$\frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{ch}\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \quad \ldots \ (8.15)$$

Keterangan:

$n_i = 6, 7, 8, \ldots$

Besaran $-\frac{E_1}{ch}$ disebut konstanta Rydberg dan disimbolkan sebagai R, yang harganya adalah $1{,}097 \cdot 10^7\ m^{-1}$. Lima deret spektrum hidrogen ditunjukkan oleh gambar 8.10 berikut.



Gambar 8.10 Lima deret spektrum atom hidrogen

Untuk dapat menerapkan penggunaan rumus-rumus di atas, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal

Berapakah panjang gelombang minimum pada deret Balmer?

Penyelesaian:

Diketahui: $n_f = 2$

Ditanyakan: λ_{min} = . . .?

Jawab:

Pada deret Balmer berlaku $n_f = 2$. Panjang gelombang minimum akan terlihat pada $n_i = \infty$.

$$\frac{1}{\lambda} = 1{,}097 \cdot 10^7 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{\infty} \right) = 3{,}65 \cdot 10^{-8}\ \text{m}$$

Kamu tentu sudah dapat menentukan panjang gelombang masing-masing deret spektrum, bukan? Sekarang, kerjakan pelatihan berikut!

Kerja Berpasangan

Kerjakan bersama teman sebangkumu!

Tentukan panjang gelombang maksimum dan minimum pada deret:

1. Lyman
2. Balmer
3. Paschen
4. Brackett
5. Pfund

F. Atom Berelektron Banyak

1. Bilangan Kuantum

Meskipun teori atom Bohr secara akurat dapat menjelaskan spektrum garis pada atom hidrogen dan atom helium yang terionisasi, tetapi teori ini tidak dapat menjawab apa yang ditunjukkan oleh analisis spektrum yang lebih teliti. Pada analisis tersebut ditemukan adanya spektrum garis yang lebih halus yang letaknya sangat berdekatan dengan atom berelektron banyak.

Hal lain yang tidak dapat dijawab oleh teori atom Bohr adalah kompleksnya spektrum yang dihasilkan oleh atom berelektron banyak, yaitu atom yang tidak cukup ditentukan hanya dengan bilangan kuantum utama (n).

Pendekatan teori atom Bohr tidak mampu memberikan jawaban yang memadai pada kasus-kasus atom berelektron banyak. Teori atom Bohr itu akhirnya dilengkapi oleh tinjauan mekanika kuantum. Tinjauan mekanika kuantum ternyata mampu memberikan jawaban atas kelemahan teori Bohr.

Dalam tinjauan mekanika kuantum dikenal empat bilangan kuantum yaitu:

a. Bilangan Kuantum Utama (n)

Bilangan Kuantum Utama

Bilangan kuantum utama menunjukkan tingkat energi elektron pada suatu orbit. Bilangan ini berharga n = 1, 2, 3 . . . . Tinjauan bilangan kuantum utama pada mekanika kuantum sama dengan tinjuan pada teori atom Bohr. Untuk atom berelektron banyak dengan nomor atom Z tingkat energi elektronnya pada suatu orbit dinyatakan sebagai:

$$E_n = \frac{13{,}6Z^2}{n^2}\text{eV} \qquad \ldots \text{(8.16)}$$

Kedudukan tingkat energi dinyatakan dengan kulit (*shell*) yaitu K untuk n = 1, L untuk n = 2, M untuk n = 3, dan seterusnya.

b. Bilangan Kuantum Orbital (ℓ)

Bilangan Kuantum Orbital

Bilangan kuantum orbital menunjukkan besarnya momentum sudut orbital elektron. Nilai bilangan kuantum orbital adalah ℓ = 0, 1, 2, 3 . . ., n-1.

Besarnya momentum sudut orbital elektron dinyatakan sebagai:

$$L = \sqrt{\ell(\ell+1)}\hbar \qquad \ldots \text{(8.17)}$$

Keterangan:

L : momentum sudut orbital (J.s)

ℓ : bilangan kuantum orbital

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

Keadaan momentum sudut orbital elektron mempunyai spesifikasi seperti ditunjukkan oleh tabel 8.1.

Tabel 8.1 Spesifikasi momentum sudut orbital elektron

Bilangan kuantum orbital (ℓ)	0	1	2	3	4 5	6	....	....
Simbol	*s*	*p*	*d*	*f*	*g*	*h*	*i*	Seterusnya urut abjad

Keterangan:

Simbol-simbol *s, p, d,* dan *f* merupakan spesifikasi hasil eksperimen dari spektrum yang artinya masing-masing *sharp* (tajam), *principal* (utama), *diffuse* (kabur), dan *fundamental* (pokok). Simbol ini disepakati sebelum teori atom dikembangkan.

c. Bilangan Kuantum Magnetik (m_ℓ)

Bilangan Kuantum Magnetik

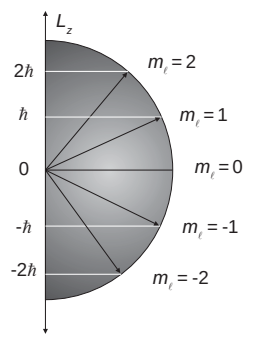
Bilangan kuantum magnetik menunjukkan kuantisasi ruang momentum sudut elektron. Elektron yang mengelilingi inti dapat kita tinjau sebagai arus kecil dengan dwi kutub magnetik. Elektron atomik yang memiliki momentum sudut berinteraksi dengan medan magnetik eksternal yang dianggap sebagai vektor medan magnetik ***B***. Bilangan kuantum magnetik menunjukkan spesifikasi arah ***L*** dengan menentukan komponen arah *L* yang searah medan magnetik. Peristiwa inilah yang disebut sebagai kuantisasi ruang.

Sekedar contoh, jika arah medan magnetik pada sumbu *Z* maka besarnya medan magnetik dalam arah sejajar sumbu ini dinyatakan sebagai berikut.

$$L_z = m_\ell h \qquad \ldots \quad (8.18)$$

Harga m_ℓ dinyatakan dengan 0, ±1, ±2, ±3, . . .±ℓ.

Gambar berikut menunjukkan kuantisasi ruang sudut elektron untuk ℓ = 2.

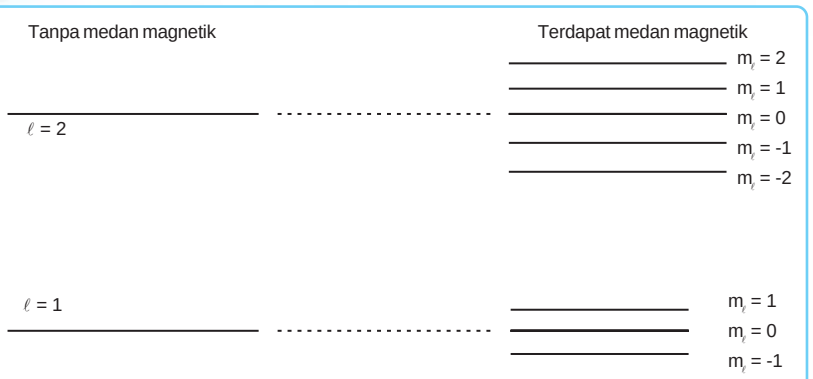


Gambar 8.11 Contoh kuantisasi ruang sudut elektron untuk ℓ = 2

Efek Zeeman

Jika suatu atom diletakkan pada medan magnetik maka spektrum garis yang dihasilkannya akan terpecah menjadi garis-garis spektral. Hal ini terjadi karena dalam medan magnetik, tingkat energi suatu atom terpecah menjadi beberapa subkeadaan sesuai dengan harga m_ℓ. Peristiwa ini disebut efek Zeeman. Nama

ini diberikan sebagai penghargaan kepada Pieter Zeeman (1865–1943). Efek Zeeman merupakan bukti terhadap adanya kuantisasi ruang. Ilustrasi peristiwa efek Zeeman ditunjukkan oleh gambar berikut.



Gambar 8.12 Efek Zeeman

Efek Zeeman ada 2 macam, yaitu efek Zeeman normal dan efek Zeeman tidak normal. Pada efek Zeeman normal, sebuah garis spektrum terpisah menjadi tiga komponen. Sedangkan pada efek Zeeman tidak normal, sebuah garis spektrum dapat terpisah menjadi lebih dari tiga komponen.

d. Bilangan Kuantum Spin (m_s)

Selain bergerak mengelilingi inti, elektron juga berputar pada sumbunya (melakukan gerak rotasi) sehingga mempunyai momentum sudut. Gerak rotasi ini disebut spin. Elektron yang melakukan gerak rotasi mempunyai sifat magnetik. Jika elektron berada dalam medan magnetik luar akibat pengaruh medan magnetik tersebut maka arah rotasi elektron bersifat searah atau berlawanan arah dengan medan magnetik luar. Untuk menyatakan keadaan ini digunakan bilangan kuantum spin (m_s). Untuk spin yang searah medan magnetik luar diberi harga $+\frac{1}{2}$ dan untuk yang berlawanan arah diberi harga $-\frac{1}{2}$.

Bilangan Kuantum Spin

2. Konfigurasi Elektron

Bukalah daftar sistem periodik unsur-unsur! Perhatikanlah bagaimana unsur-unsur tersebut dikelompokkan! Bagaimana penataan konfigurasi elektronnya?

Beberapa hal yang perlu kita jadikan pegangan dalam menentukan konfigurasi elektron antara lain sebagai berikut.

a. Prinsip Larangan Pauli

Pada tahun 1925 Wolfgang Pauli merumuskan keadaan elektron yang dikenal dengan prinsip larangan Pauli. Pauli menyatakan bahwa tidak ada dua buah elektron dalam suatu atom yang mempunyai empat bilangan kuantum yang sama.

Prinsip Larangan Pauli

Konsekuensi prinsip larangan Pauli terhadap struktur atom adalah:

1) jumlah maksimum elektron pada bilangan kuantum utama n adalah $2n^2$
2) jumlah maksimum bilangan kuantum orbital ℓ adalah $2(2\ell + 1)$

Tabel 8.2 berikut ini adalah contoh susunan elektron dalam atom berdasarkan prinsip di atas.

Tabel 8.2 Contoh Susunan Elektron dalam Atom Sesuai Prinsip Larangan Pauli

n	ℓ	m_ℓ	m_s	Jumlah Elektron
1	0	0	$+\frac{1}{2}$	2
			$-\frac{1}{2}$	
2	0	0	$+\frac{1}{2}$	8
			$-\frac{1}{2}$	
	1	-1	$+\frac{1}{2}$	
			$-\frac{1}{2}$	
		0	$+\frac{1}{2}$	
			$-\frac{1}{2}$	
		1	$+\frac{1}{2}$	
			$-\frac{1}{2}$	
3	0	0	$+\frac{1}{2}$	18
			$-\frac{1}{2}$	
	1	-1	$+\frac{1}{2}$	
			$-\frac{1}{2}$	
		0	$+\frac{1}{2}$	
			$-\frac{1}{2}$	
		1	$+\frac{1}{2}$	
			$-\frac{1}{2}$	
	2	-2	$+\frac{1}{2}$	
			$-\frac{1}{2}$	

		-1	$+\frac{1}{2}$
			$-\frac{1}{2}$
		0	$+\frac{1}{2}$
			$-\frac{1}{2}$
		1	$+\frac{1}{2}$
			$-\frac{1}{2}$
		2	$+\frac{1}{2}$
			$-\frac{1}{2}$

b. Kaidah Dasar Struktur Konfigurasi Elektron

Sebelum kita menentukan susunan konfigurasi elektron pada suatu atom, perlu kita perhatikan kaidah dasar dalam konfigurasi elektron. Kaidah dasar dalam menentukan struktur konfigurasi elektron pada atom berelektron banyak adalah sebagai berikut.

1. Sebuah sistem akan stabil bila energi totalnya minimum.
2. Hanya ada satu elektron yang dapat berada dalam keadaan kuantum tertentu (ingat prinsip larangan Pauli).

Misalnya konfigurasi elektron natrium dengan nomor atom 11 dituliskan sebagai:

$1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^1$

Ini berarti:

1. Pada subkulit 1*s* ($n = 1$, $\ell = 0$) dan 2*s* ($n = 2$, $\ell = 0$) masing-masing terisi dua elektron.
2. Pada subkulit 2*p* ($n = 2$, $\ell = 1$) berisi 6 elektron
3. Pada subkulit 3*s* ($n = 3$, $\ell = 0$) berisi 1 elektron

Tabel 8.3 menunjukkan contoh konfigurasi elektron untuk beberapa unsur.

Tabel 8.3 Mekanisme konfigurasi elektron

Unsur	*K*	*L*	*M*	*N*	*O*
	1*s*	2*s* 2*p*	3*s* 3*p* 3*d*	4*s* 4*p* 4*d* 4*f*	5*s* 5*p* 5*d* 5*f*
^{1}H	1				
^{2}He	2				
^{3}Li	2	1			
^{4}Be	2	2			
^{5}B	2	2 1			
^{6}C	2	2 2			
^{7}N	2	2 3			
^{8}O	2	2 4			
^{9}F	2	2 5			
^{10}Ne	2	2 6			
^{11}Na	2	2 6	1		
^{12}Mg	2	2 6	2		
^{13}Al	2	2 6	2 1		
^{14}Si	2	2 6	2 2		
^{15}P	2	2 6	2 3		
^{16}S	2	2 6	2 4		
^{17}Cl	2	2 6	2 5		
^{18}Ar	2	2 6	2 6		
^{19}K	2	2 6	2 6 -	1	*
^{20}Ca	2	2 6	2 6 -	2	*
^{21} Sc	2	2 6	2 6 1	2	*

Keterangan:

Perhatikan bahwa sesuai kaidah pertama, pada unsur K, Ca, dan Sc pada tabel 8.3 subkulit 4*s* akan terisi lebih dahulu daripada 3*d*! Hal ini karena tingkat energi 4*s* lebih rendah daripada 3*d*.

Kerja Kelompok

Kerjakan soal berikut bersama kelompokmu!

1. Tentukan konfigurasi elektron dan tingkat energi elektron terluar dari atom-atom berikut!
   a. ^{28}Ni
   b. ^{39}Y
   c. ^{55}Ce
   d. ^{79}Au
   e. ^{92}U
2. Bukalah daftar sistem periodik unsur!

3. Perhatikan susunan konfigurasi elektron pada masing-masing atom tersebut di atas!
4. Diskusikan hasil temuan itu dengan teman sekelompokmu!
5. Presentasikan di depan kelas hasil diskusimu tersebut!

Rangkuman

1. Atom berasal dari bahasa Yunani yaitu 'atomos' yang berarti tidak dapat dibagi.
2. Sinar katode adalah sinar yang terjadi akibat perpindahan elektron dari katode di dalam tabung hampa dengan beda potensial yang sangat tinggi.
3. Teori atom Bohr dilandasi oleh dua postulat, yaitu:
   a. Elektron bergerak mengelilingi inti pada suatu orbit dengan tingkat energi tertentu yaitu sebesar:

$$E_n = \frac{13{,}6Z^2}{n^2} eV$$

   b. Elektron dapat berpindah dari satu orbit ke orbit lain dengan melepas atau menyerap energi.
4. Teori atom modern dilandasi oleh mekanika kuantum dan dikenal empat bilangan kuantum, yaitu:
   a. bilangan kuantum utama (n)
   b. bilangan kuantum orbital (ℓ)
   c. bilangan kuantum magnetik (m_ℓ)
   d. bilangan kuantum spin (m_s)
5. Prinsip larangan Pauli mengatakan bahwa tidak ada dua elektron pada suatu orbit memiliki empat bilangan kuantum yang sama.

Soal-soal Uji Kompetensi

A. *Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!*

1. Pernyataan berikut merupakan sifat sinar katode, kecuali . . . .
   a. sinar katode merambat menurut garis lurus di udara
   b. sinar katode merupakan partikel-partikel
   c. dipengaruhi oleh medan listrik dan medan magnetik
   d. dihasilkan pada tabung hampa
   e. tidak dapat melewati udara biasa pada tegangan tinggi
2. Bilangan kuantum yang menunjukkan kuantisasi momentum sudut elektron disebut bilangan kuantum . . . .
   a. utama
   b. orbital
   c. magnetik
   d. orbital spin
   e. spin
3. Energi total sebuah atom hidrogen pada keadaan dasar adalah . . . .
   a. 1,36 eV
   b. 2,72 eV
   c. 4,08 eV
   d. 5,44 eV
   e. 13,6 eV
4. Besarnya jari-jari lintasan elektron dalam suatu atom (jari-jari kuantum) adalah . . . .
   a. sebanding dengan bilangan kuantum
   b. berbanding terbalik dengan bilangan kuantum
   c. berbanding terbalik dengan kuadrat bilangan kuantum
   d. sebanding dengan kuadrat bilangan kuantum
   e. sebanding dengan tetapan Planck
5. Garis-garis spektrum deret Balmer terbentuk bila elektron berpindah dari . . . .
   a. $n = 2, 3, 4, 5, \ldots$ ke $n = 1$
   b. $n = 3, 4, 5, 6, \ldots$ ke $n = 2$
   c. $n = 4, 5, 6, 7, \ldots$ ke $n = 3$
   d. $n = 5, 6, 7, 8, \ldots$ ke $n = 4$
   e. $n = 6, 7, 8, 9, \ldots$ ke $n = 5$
6. Berdasarkan teori atom Bohr besarnya momentum anguler elektron pada lintasan tertentu adalah . . . .
   a. berbanding lurus dengan tetapan Planck
   b. berbanding terbalik dengan tetapan Planck
   c. berbanding lurus dengan tetapan Rydberg
   d. tidak dipengaruhi bilangan kuantum utama
   e. berbanding terbalik dengan tingkat energinya
7. Dalam percobaannya, Rutherford menggunakan partikel alfa untuk menembak inti hidrogen. Tujuan dari percobaan tersebut adalah . . . .
   a. menguji teori atom Dalton
   b. membentuk inti baru
   c. mengukur jari-jari inti
   d. menguji teori atom Thomson
   e. menciptakan teori baru tentang atom
8. Transisi elektron dalam sebuah atom hidrogen yang memancarkan foton dengan frekuensi paling rendah adalah . . . .
   a. dari $n = 1$ ke $n = 2$
   b. dari $n = 2$ ke $n = 1$
   c. dari $n = 2$ ke $n = 6$
   d. dari $n = 6$ ke $n = 2$
   e. dari $n = 1$ ke $n = 3$

9. Besarnya energi kinetik suatu atom hidrogen pada keadaan dasar adalah . . . .
   a. 1,36 eV
   b. 2,72 eV
   c. 4,08 eV
   d. 5,44 eV
   e. 13,6 eV
10. Tingkat energi elektron di dalam atom hanya boleh mempunyai harga tertentu dan besarnya adalah . . . .
   a. berbanding lurus dengan bilangan kuantum utama
   b. berbanding lurus dengan kuadrat bilangan kuantum utama
   c. berbanding terbalik dengan bilangan kuantum utama
   d. berbanding terbalik dengan kuadrat bilangan kuantum utama
   e. berbanding terbalik dengan tetapan Planck

B. ***Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!***

1. Sebuah atom hidrogen yang berada dalam keadaan dasar menyerap sebuah foton sehingga tereksitasi ke $n = 3$. Tentukan frekuensi, panjang gelombang, dan energi foton tersebut!
2. Tentukan panjang gelombang terpendek dan terpanjang deret Lyman yang dipancarkan atom hidrogen!
3. Tentukan jari-jari orbit, energi kinetik, dan energi potensial elektron sebuah atom hidrogen pada $n = 2$!
4. Sebut dan jelaskan perkembangan teori model atom!
5. Tentukan konfigurasi pada atom-atom berikut!
   a. ^{26}Fe
   b. ^{30}Zn
   c. ^{47}Ag

BAB
9

RELATIVITAS

Gerbang

Gambar 9.1 Dua pesawat supersonik yang terbang beriringan

Perhatikan gambar diatas! Pada gambar tampak dua buah pesawat supersonik yang terbang beriringan. Pesawat supersonik adalah pesawat yang memiliki kecepatan maksimum melebihi kecepatan bunyi. Jika kamu mengamati gerakan pesawat tersebut dari bumi, kamu akan melihat bahwa pesawat bergerak sangat cepat. Pernahkah terlintas dalam pikiranmu bagaimana pergerakan salah satu pesawat tersebut jika diamati oleh pilot pada pesawat lainnya? Samakah besar kecepatan yang kamu amati dengan yang diamati oleh pilot? Untuk dapat menjawab pertanyaan diatas, pelajarilah materi berikut!.

Kata Kunci: Transformasi Galileo – Postulat Einstein – Transformasi Lorentz – Dilatasi Waktu – Energi Relativistik

A. Fisika Klasik

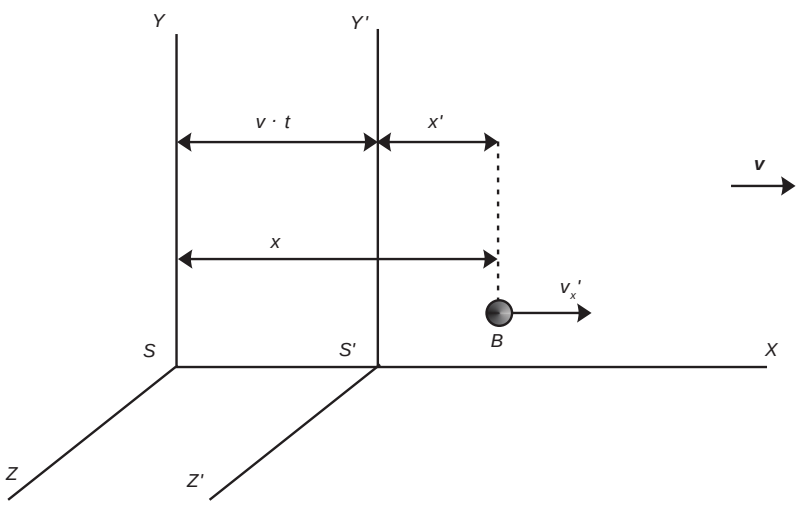
Fisika klasik yang banyak mengacu pada teori Newton mampu menjawab fenomena-fenomena gerak yang dapat teramati dalam keseharian. Akan tetapi, gerak dalam konsep fisika klasik ternyata masih sangat terbatas pada gerak untuk benda-benda dengan kecepatan yang sangat rendah. Lantas, bagaimana gerak benda-benda dengan kecepatan yang sangat tinggi, misalnya elektron dan cahaya? Banyak hal pada fenomena-fenomena ini yang tidak terjawab oleh konsep fisika klasik, sehingga para ahli terus bekerja keras untuk mencari jawaban atas pertanyaan-pertanyaan ini.

Pada akhir abad ke-19 banyak penemuan yang sangat mengejutkan. Penemuan itu antara lain gelombang elektromagnetik oleh Maxwell, radioaktivitas oleh Henri Becquerel, teori dualisme partikel-gelombang oleh De Broglie, dan yang terkenal adalah teori relativitas Einstein. Temuan-temuan ini membawa manusia pada peradaban baru.

B. Transformasi Galileo

Pada saat kamu duduk membaca buku ini di dalam suatu ruangan, kamu dikatakan dalam keadaan diam karena posisimu tetap terhadap tempat duduk. Tetapi sadarkah kamu, bahwa ternyata pada saat yang sama kamu sedang bergerak dengan kecepatan tidak kurang dari 1.600 km/jam terhadap sumbu rotasi bumi? Sementara itu, kita juga bergerak bersama bumi mengelilingi matahari, dan bersama matahari kita bergerak mengelilingi pusat galaksi kita. Dari kenyataan ini jelas bahwa tidak ada gerak mutlak, yang ada adalah gerak yang relatif. Pernyataan ini dikenal sebagai relativitas Newton. Kedudukan suatu benda diam atau bergerak memerlukan suatu kerangka acuan.

Coba perhatikan kerangka acuan seperti ditunjukkan gambar 9.2 berikut!



Gambar 9.2 Kedudukan sebuah benda dilihat dari dua kerangka acuan *S* dan *S'*

Anggaplah *S* adalah sebuah tiang di stasiun kereta api dan *S'* adalah gerbong kereta api yang bergerak dengan kecepatan *v* terhadap stasiun! *B* adalah seorang penumpang yang bergerak di dalam kereta api searah dengan arah gerak kereta api.

Terhadap kerangka acuan *S*, *B* memiliki koordinat *B* (*x*, *y*, *z*) dan terhadap kerangka acuan *S'* memiliki koordinat *B* (*x'*, *y'*, *z'*). Pada kedua kerangka acuan tersebut terdapat hubungan berikut.

$$x' = x - vt$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$

. . . (9.1)

Dalam tinjauan ini kita menganggap waktu yang diamati oleh pengamat yang berada di kedua kerangka acuan adalah sama. Secara matematis dapat dituliskan sebagai:

$$t = t' \quad \ldots (9.2)$$

Kedua persamaan di atas dikenal sebagai transformasi Galileo.

Transformasi Galileo

Jika persamaan 9.1 kita turunkan terhadap waktu akan diperoleh:

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - v$$

Bentuk $\frac{dx'}{dt} = v_x'$ tidak lain adalah kecepatan benda B terhadap S' dan $\frac{dx}{dt} = v_x$ adalah kecepatan benda B terhadap S.

Dengan demikian bentuk diferensial dari persamaan 9.1 adalah:

$$v_x' = v_x - v \quad \ldots (9.3)$$

$$v_y' = \frac{dy'}{dt} = \frac{dy}{dt} = v_y \quad \ldots (9.4)$$

$$v_z' = \frac{dz'}{dt} = \frac{dz}{dt} = v_z \quad \ldots (9.5)$$

Jika persamaan kecepatan kita turunkan terhadap waktu maka akan kita dapatkan persamaan percepatan berikut.

$$a_x' = \frac{dv_x'}{dt} = \frac{dv_x}{dt} = a_x \quad \ldots (9.6)$$

$$a_y' = \frac{dv_y'}{dt} = \frac{dv_y}{dt} = a_y \quad \ldots (9.7)$$

$$a_z' = \frac{dv_z'}{dt} = \frac{dv_z}{dt} = a_z \quad \ldots (9.8)$$

Dari persamaan 9.6 dapat kita lihat bahwa percepatan pada kerangka acuan S' sama dengan percepatan pada kerangka acuan S. Jika massa benda pada kedua kerangka acuan kita anggap sama, misalnya m maka gaya yang bekerja pada benda dilihat dari kedua kerangka acuan tersebut juga sama, yaitu:

$F = m \cdot a$ dan $F' = m \cdot a'$

atau

$$F = F' \quad \ldots (9.9)$$

Dengan demikian dapat kita simpulkan bahwa hukum Newton tentang gerak berlaku untuk semua kerangka acuan inersial. Kerangka acuan inersial adalah kerangka acuan di mana berlaku hukum kelembaman Newton.

Untuk memudahkan pemahamanmu terhadap materi di atas, pelajarilah dengan cermat contoh soal di bawah ini!

Contoh Soal

Sebuah kereta api bergerak melintasi stasiun dengan kecepatan 72 km/jam. Seorang penumpang dalam sebuah gerbong berjalan searah gerak kereta api dengan kecepatan 5 km/jam. Berapakah kecepatan penumpang tersebut menurut pengamat yang berdiri di stasiun?

Penyelesaian:

Diketahui: v = 72 km/jam

v_x' = 5 km/jam

Ditanyakan: v_x = . . . ?

Jawab:

$v_x' = v_x - v$ --------> $v_x = v_x' + v$

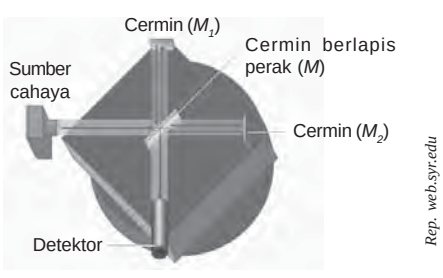
v_x = 5 km/jam + 72 km/jam

= 77 km/jam

Jadi, kecepatan penumpang menurut pengamat yang diam di stasiun adalah 77 km/jam.

C. Percobaan Michelson-Morley dan Kegagalan Teori Eter

Ketika mempelajari gelombang mekanik, kita tahu bahwa gelombang memerlukan medium untuk merambat. Semula orang menganggap bahwa cahaya memerlukan medium untuk merambat. Seorang fisikawan Belanda, Christiaan Huygens, mengusulkan bahwa medium yang merambatkan cahaya adalah eter. Eter dianggap diam relatif terhadap bintang yang jauh, sehingga tidak menimbulkan hambatan terhadap cahaya.

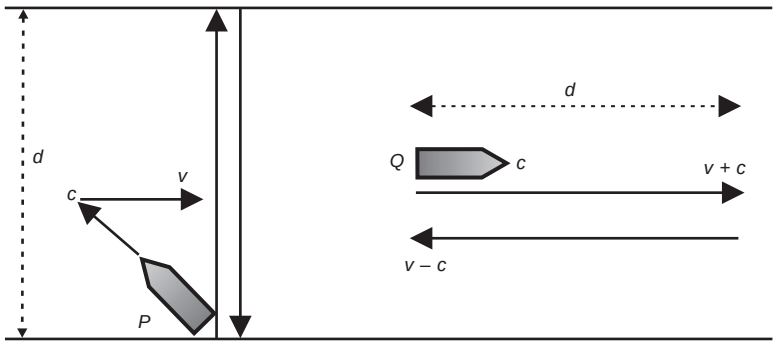


Gambar 9.3 Interferometer yang digunakan oleh Michelson dan Morley untuk membuktikan keberadaan eter

Percobaan Michelson-Morley

Pada tahun 1887, Albert Michelson dan Edward Morley melakukan percobaan untuk membuktikan kebenaran teori eter. Mereka menggunakan alat yang disebut interferometer seperti pada gambar 9.3 untuk mengukur kecepatan relatif eter terhadap bumi.

Analogi sederhana prinsip perhitungan yang dilakukan Michelson dan Morley adalah dengan pendekatan fisika klasik. Pendekatan tersebut menganggap arah gerak relatif eter terhadap bumi sebagai aliran arus air sungai dan arah gerak cahaya sebagai gerakan perahu *P* dan *Q* yang masing-masing bergerak sejajar dan tegak lurus arus air seperti gambar 9.4 berikut.



Gambar 9.4 Analogi percobaan Michelson dan Morley untuk menguji kebenaran teori eter

Kita asumsikan bahwa kecepatan relatif eter terhadap bumi adalah *v*. Dengan demikian, waktu yang ditempuh *P* bolak-balik untuk tetap bergerak tegak lurus arus adalah:

$$t_P = 2\frac{d}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{\frac{2d}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \ldots (9.10)$$

Waktu yang diperlukan *Q* untuk gerak bolak-balik sejajar arus adalah:

$$t_Q = \frac{d}{c + v} + \frac{d}{c - v}$$

$$t_Q = \frac{2dc}{c^2 - v^2} = \frac{\frac{2d}{c}}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \ldots (9.11)$$

Perbandingan waktu tempuh *P* dan *Q* adalah:

$$\frac{t_P}{t_Q} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \ldots (9.12)$$

Jika kecepatan cahaya diketahui dan perbandingan waktunya diketahui maka *v* dapat dihitung.

Pada percobaan Michelson–Morley sinar-sinar yang dipantulkan oleh cermin M_1 dan M_2 pada interferometer akan ditangkap oleh detektor. Sinar-sinar tersebut membentuk pola interferensi bergantung pada selisih jarak

tempuh cahaya. Jika jarak yang ditempuh cahaya dari kedua cermin ke M adalah sama maka selisih fase gelombang cahaya yang sampai adalah $ct_Q - ct_P$. Jika jarak cermin M_1 dan M_2 ke cermin M adalah d, selisih jaraknya menjadi:

$$\Delta s = \frac{2d}{1-\frac{v^2}{c^2}} - \frac{2d}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta s = 2d\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \ldots (9.13)$$

Dengan bantuan binominal Newton $(a + b)^n$ akan kita peroleh:

$$\Delta s = d\,\frac{v^2}{c^2} \quad \ldots (9.14)$$

Selisih jarak kedua sinar akan membentuk pola interferensi yang dapat dilihat pada detektor.

Jika seluruh alat diputar 90° terhadap sumbu vertikal, arah kecepatan eter v tidak berubah, tetapi sinar yang datang dari M_1 dan M_2 bertukar tempat. Hal ini menyebabkan terjadinya selisih jarak antara kedua sinar tersebut dan seharusnya mengubah pergeseran letak interferensi maksimum. Kenyataan dari hasil eksperimen ini adalah tidak pernah ditemukan pergeseran letak interferensi maksimum. Berdasarkan hasil eksperimen ini disimpulkan bahwa:

1. Teori eter alam gugur secara eksperimental.
2. Cahaya merambat ke segala arah dengan kecepatan sama, tidak tergantung pada gerak pengamat.

D. Postulat Einstein

Dari pembahasan sebelumnya diketahui bahwa teori fisika klasik tidak dapat menjelaskan gerak benda-benda yang kecepatannya tinggi. Hal ini menggugah para fisikawan untuk terus meneliti gerak benda tersebut, salah satunya adalah Albert Einstein. Pada tahun 1905 Albert Einstein mengemukakan teori relativitas khusus. Ia mengajukan dua postulat dalam teori relativitas khusus yang terkenal sebagai postulat Einstein, yaitu:

Postulat Einstein

1. Hukum-hukum Newton dapat dinyatakan dalam persamaan yang berbentuk sama (invarian) untuk semua kerangka acuan inersial.

   Dalam bentuk lain postulat ini menyatakan bahwa kita tidak mungkin mengukur gerak mutlak suatu benda. Sebagai contoh, sebuah roket bergerak dengan kecepatan 100 m/s mendekati bulan.

Hal tersebut dapat dikatakan bahwa bulan bergerak mendekati pesawat dengan kecepatan 100 m/s jika ditinjau dari titik acuan di roket. Sebenarnya ini merupakan perluasan dari relativitas Newton yang mencakup seluruh jenis pengukuran fisis.

2. Kecepatan cahaya untuk semua pengamat adalah sama, tidak tergantung pada keadaan gerak pengamat.

Jika sebuah pesawat bergerak dengan kecepatan cahaya (c) mendekati pengamat yang diam di bumi maka bersamaan dengan itu ia akan melepaskan sinyal cahaya. Menurut postulat ini pengamat di bumi akan melihat laju cahaya tersebut juga dalam kecepatan c pula. Hal ini berbeda dengan konsep relativitas Newton di mana laju cahaya besarnya adalah $2c$. Hal ini menuntut perlunya peninjauan kembali tentang berbagai konsep fisika klasik tentang gerak, waktu, massa, dan besaran-besaran fisis lain.

E. Transformasi Lorentz

Postulat Einstein menyebabkan peninjauan kembali tentang banyak hal. Salah satu cara peninjauan tersebut adalah dengan transformasi Lorentz. Perhatikan kembali gambar 9.2 pada halaman 153. Hubungan antara x' dan x menurut transformasi Lorentz adalah:

Transformasi Lorentz

$$x' = k\,(x - vt) \qquad \ldots (9.15)$$

Hubungan x dan x' ini bersifat linear, artinya suatu kejadian dalam kerangka acuan S bersesuaian dengan kejadian dalam kerangka acuan S'. Berdasarkan postulat pertama Einstein, transformasi balik untuk x dinyatakan sebagai:

$$x = k\,(x' + vt') \qquad \ldots (9.16)$$

Faktor k untuk kedua kerangka acuan haruslah sama. Demikian pula berlaku:

$$y' = y \qquad \ldots (9.17)$$

$$z' = z \qquad \ldots (9.18)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 9.15 ke persamaan 9.16 kita peroleh:

$$x = k^2\,(x - vt) + k\,(vt') \quad \text{dan} \quad t' = kt + \left(\frac{1-k^2}{kv}\right)x \qquad \ldots (9.19)$$

Untuk menentukan harga k, kita mengacu pada postulat kedua. Kita asumsikan bahwa saat $t = 0$, kedua kerangka S dan S' berada pada tempat yang sama, sehingga $t' = 0$. Pengamat pada masing-masing kerangka melakukan pengukuran kelajuan cahaya yang memancar dari titik tersebut. Keduanya harus mendapatkan kelajuan yang sama yaitu c. Ini berarti pada kerangka S berlaku:

$$x = c \cdot t \qquad \ldots (9.20)$$

Sedangkan pada kerangka S' berlaku:

$$x' = c \cdot t' \qquad \ldots (9.21)$$

Jika x' dan t' kita substitusikan pada persamaan 9.21 dengan bantuan persamaan 9.15 dan 9.19 akan kita peroleh:

$$k\,(x - vt) = ckt + \left(\frac{1-k^2}{kv}\right)cx$$

Nilai x kita peroleh dari persamaan berikut.

$$x = \frac{ckt - vkt}{k - \left(\frac{1-k^2}{kv}\right)c} = ct\left(\frac{k + \frac{kv}{c}}{k - \left(\frac{1-k^2}{kv}\right)c}\right) = ct\left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \left(\frac{1}{k^2} - 1\right)\frac{c}{v}}\right)$$

Persamaan ini akan sama dengan persamaan 9.20 jika faktor dalam kurung sama dengan 1. Dengan demikian $\left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \left(\frac{1}{k^2} - 1\right)\frac{c}{v}}\right) = 1$ dan kita peroleh:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad \ldots (9.22)$$

Dengan mensubtitusikan persamaan 9.22 kita peroleh bentuk persamaan transformasi Lorentz secara lengkap, yaitu:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad \ldots (9.23)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad \ldots (9.24)$$

Sedangkan persamaan transformasi balik Lorentz adalah sebagai berikut.

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \ldots (9.25)$$

$$y = y' \quad \ldots (9.26)$$

$$z = z' \quad \ldots (9.27)$$

$$t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \ldots (9.28)$$

F. Aturan Penjumlahan Kecepatan

Postulat kedua Einstein mengakibatkan peninjauan kembali pada aturan penjumlahan kecepatan pada transformasi fisika klasik. Dari transformasi Lorentz kita dapat menghitung hubungan antara kecepatan menurut kerangka *S* dan *S'*. Caranya adalah dengan mendiferensialkan persamaan 9.23 dan 9.24 sehingga akan kita peroleh:

$$dx' = \frac{dx - v\,dt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \ldots (9.29)$$

$$dt' = \frac{dt - \frac{v\,dx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \ldots (9.30)$$

Dengan demikian:

$$v_x' = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - v\,dt}{dt - \left(\frac{v}{c^2}\right)dx}$$

$$v_x' = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v_x v}{c^2}} \quad \ldots (9.31)$$

dengan cara yang sama kita dapatkan:

$$v_y' = \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{dt - \frac{v^2}{c^2}} \quad \ldots (9.32)$$

$$v_z = \frac{dz'}{dt'} = \frac{dz\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{dt - \frac{v^2}{c^2}} \quad \ldots (9.33)$$

dan

$$v_x = \frac{v_x' + v}{1 + \frac{v_x' v}{c^2}} \quad \ldots (9.34)$$

Keterangan:

v_x : kecepatan benda terhadap kerangka acuan S (m/s)

v_x' : kecepatan benda terhadap kerangka acuan S' (m/s)

v : kecepatan S terhadap S' (m/s)

c : kecepatan cahaya ($3 \cdot 10^8$ m/s)

Untuk lebih jelasnya, simaklah contoh soal berikut ini!

Contoh Soal

Sebuah pesawat antargalaksi bergerak dengan kecepatan 0,4 c terhadap pengamat di bumi. Pesawat tersebut melepaskan roket dengan kecepatan 0,5 c searah gerak pesawat. Berapakah kecepatan roket terhadap pengamat di bumi?

Penyelesaian:

Diketahui: $v = 0{,}4\,c$

$v_x' = 0{,}5\,c$

Ditanyakan: $v_x = \ldots ?$

Jawab:

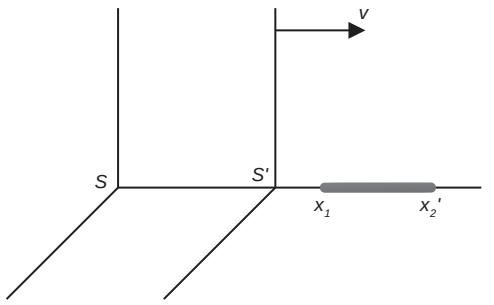
$$v_x = \frac{v_x' + v_x}{1 + \frac{v_x' v}{c^2}}$$

$$v_x = \frac{0{,}5c + 0{,}4c}{1 + \frac{0{,}2c^2}{c^2}}$$

$$v_x = \frac{0{,}9c}{1 + 0{,}2}$$

$$v_x = 0{,}75c$$

G. Kontraksi Panjang



Gambar 9.5 Kontraksi panjang

Konsekuensi lain dari postulat Einstein adalah pengukuran panjang menurut pengamat terhadap benda-benda yang bergerak. Misalnya sebuah tongkat dalam kerangka acuan S' kedudukan ujung-ujungnya adalah $x_2' - x_1'$ berada dalam keadaan diam. Orang di S' mengukur panjang tongkat ini adalah $L_o = x_2' - x_1'$. Perhatikan gambar 9.5!

Menurut pengamat di S panjang tongkat adalah $L = x_2 - x_1$. Dengan menggunakan transformasi Lorentz kita dapatkan:

$$x_2' - x_1' = \frac{x_1 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{atau} \quad L = L_o\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad \ldots (9.35)$$

Ternyata orang di S yang bergerak relatif terhadap tongkat mengukur panjang tongkat relatif lebih pendek daripada panjang tongkat menurut orang di S' yang diam terhadap tongkat. Peristiwa ini disebut sebagai kontraksi panjang.

Kontraksi Panjang

Contoh Soal

Garis tengah sebuah asteroid menurut seorang pilot yang berada di dalam pesawat ruang angkasa yang sedang bergerak dengan kecepatan 0,6 c adalah 100 m. Berapakah panjang garis tengahnya jika diukur oleh seseorang yang berhasil mendarat di asteroid tersebut?

Penyelesaian:

Diketahui: $v = 0{,}6\ c$

$L = 100$ m

Ditanyakan: $L_o = \ldots ?$

Jawab:

Dengan menggunakan persamaan 9.35 kita dapat mengetahui panjang asteroid dari acuan yang diam terhadapnya, yaitu:

$$L = L_o\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$L_o = \frac{L}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$L_o = \frac{100}{\sqrt{1-\frac{(0,6\,c)^2}{c^2}}}$$

$$L_o = \frac{100}{\sqrt{1-\frac{0,36\,c^2}{c^2}}}$$

$$L_o = \frac{100}{\sqrt{1-0,36}}$$

$$L_o = \frac{100}{\sqrt{0,64}}$$

$$L_o = \frac{100}{0,8}$$

L_o = 125 m

Kerja Kelompok

Kerjakan dengan baik bersama kelompokmu!

1. Carilah satu fenomena alam yang menunjukkan kebenaran konsep kontraksi panjang! Kamu dapat mencarinya di buku-buku perpustakaan atau internet.
2. Diskusikanlah hasil temuan tersebut bersama kelompokmu!
3. Ketik atau tulislah dengan rapi hasil diskusi kelompokmu pada kertas folio!

   Jangan lupa mencantumkan sumber bacaan atau referensi yang kamu kutip!
4. Kumpulkan hasil kerja kelompokmu sebagai tambahan koleksi perpustakaan sekolah!

H. Dilatasi Waktu

Akibat penting dari postulat Einstein dan transformasi Lorentz adalah bahwa selang waktu antara dua kejadian yang berada di tempat yang sama dalam suatu kerangka acuan akan selalu lebih singkat daripada selang waktu antara kejadian yang sama dalam kerangka acuan lain yang terjadi pada tempat yang berbeda. Dengan kata lain bahwa ada perbedaan waktu yang terukur oleh pengamat dalam kerangka *S* dan *S'*. Kita tinjau dua kejadian terjadi pada x_o' dalam selang waktu t_1' dan t_2' dalam kerangka *S'*. Kita dapat menghitung selang waktu kejadian tersebut dalam kerangka

S sebagai t_1 dan t_2. Dengan menggunakan persamaan 9.28 akan kita peroleh:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{t_2' + \frac{vx_0'}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - \frac{t_1' + \frac{vx_0'}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad \ldots (9.36)$$

$\Delta t'$ adalah selang waktu yang diukur dalam kerangka acuan S' dan Δt diukur dalam kerangka acuan sembarang S. Terlihat bahwa selang waktu yang diukur pada S selalu lebih panjang daripada waktu sebenarnya (*proper time*). Pemekaran waktu ini disebut sebagai dilatasi waktu.

Dilatasi Waktu

Paradoks anak kembar merupakan fenomena dilatasi waktu yang *A* dan *B* berusia 20 tahun. *A* mengembara ke suatu bintang yang jaraknya 20 tahun cahaya dengan kelajuan 0,8 *c*.

Terhadap kembarannya yang berada di bumi, *A* akan kelihatan hidup lebih lambat selama dalam perjalanan. Selang waktu untuk setiap detak jantung, pertumbuhan sel, dan tarikan nafas kelajuannya hanya 60 % daripada *B* yang ada di bumi.

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1-\frac{(0,8\,c)^2}{c^2}} = 0,6\ \Delta t$$

Setelah 50 tahun menurut perhitungan *B*, *A* kembali dan mengambil waktu 60 % nya. Menurut *A*, ia telah meninggalkan bumi selama 30 tahun. Sehingga umur *A* ketika sampai di bumi adalah 50 tahun dan umur *B* adalah 70 tahun.

Agar lebih paham mengenai dilatasi waktu, pelajarilah contoh soal berikut ini kemudian kerjakan pelatihan di bawahnya!

Contoh Soal

Dua buah kilatan cahaya yang terjadi di bumi diukur oleh pengamat di bumi dalam selang waktu 2 sekon. Berapakah selang waktu kejadian ini menurut seorang pilot pesawat yang bergerak dengan kecepatan 0,8 *c* terhadap bumi?

Penyelesaian:

Diketahui: $\Delta t' = 2$ sekon

$v = 0,8\ c$

Ditanyakan: $\Delta t = \ldots ?$

Jawab:

$$\Delta t = \frac{2}{\sqrt{1-\frac{0,64\,c^2}{c^2}}} = 3,33 \text{ sekon.}$$

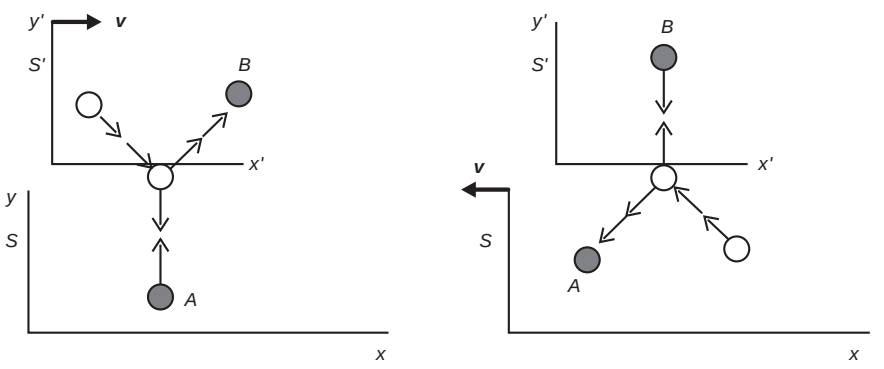
Kerja Mandiri

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

1. Berapa persenkah penyusutan panjang yang dialami suatu batang yang diamati oleh pengamat yang diam jika batang bergerak dengan kecepatan 0,8 *c*?
2. Sebuah pesawat bergerak dengan kecepatan 0,8 *c*. Pesawat itu kemudian menembakkan peluru dengan kecepatan 0,6 *c*. Berapa kecepatan peluru menurut pengamat yang diam di bumi?
3. Berapakah perbandingan dilatasi waktu suatu sistem yang bergerak dengan kelajuan 0,6 *c* dengan sistem yang bergerak dengan kelajuan 0,8 *c*?

I. Momentum Relativistik

Perubahan relativistik pada kecepatan, panjang, dan waktu juga mempengaruhi tinjauan terhadap konsep momentum. Perhatikan gambar 9.6!



Gambar 9.6 (a) Peristiwa tumbukan dilihat oleh pengamat dalam kerangka *S* dan (b) Peristiwa tumbukan dilihat oleh pengamat dalam kerangka *S'*

Pada gambar 9.6 terlihat tumbukan lenting sempurna antara dua benda *A* dan *B* yang diamati oleh pengamat dalam kerangka acuan *S* dan *S'*. Kita anggap benda *A* dan *B* identik jika ditinjau dari kerangka diam. Massa masing-masing adalah m_A dan m_B.

Sebelum tumbukan benda *A* diam terhadap kerangka *S* dan benda *B* diam terhadap kerangka *S'*. Kemudian pada saat yang sama benda *A* dilempar pada arah sumbu *y* positif (+*y*) dengan kecepatan v_A dan *B* dilempar pada arah sumbu *y'* negatif (-*y'*) dengan kecepatan v_B', sementara itu *S'* bergerak ke arah sumbu *x* positip (+*x*). Dalam hal ini berlaku:

$$v_A = v_B' \qquad \ldots (9.37)$$

Dengan demikian perilaku *A* ditinjau dari *S* sama dengan perilaku *B* ditinjau dari *S'*. Setelah terjadi tumbukan, benda *A* akan memantul ke arah *-y* dan *B* akan memantul ke arah *+y'*. Anggaplah panjang lintasan bolak-balik masing-masing benda adalah *Y*. Sesuai transformasi Lorentz, harga *Y* adalah sama untuk kedua kerangka acuan (*Y' = Y)* karena arah gerak relatif *S'* sejajar sumbu *X*. Waktu tempuh bolak-balik *A* dalam kerangka *S* adalah:

$$t_A = \frac{Y}{v_A} \quad \ldots (9.38)$$

Sedangkan waktu tempuh bolak-balik *B* dalam kerangka *S'* adalah:

$$t_B = \frac{Y}{v_B'} \quad \ldots (9.39)$$

Dalam hal ini $t_A = t_B' = t_0$.

Jika dalam kerangka *S* berlaku hukum kekekalan momentum maka:

$$m_A v_A = m_B v_B \quad \ldots (9.40)$$

Besaran v_A dan v_B menunjukkan kecepatan benda *A* dan *B* ditinjau dalam kerangka *S*, dengan nilai v_B adalah:

$$v_B = \frac{Y}{t} \quad \ldots (9.41)$$

Menurut pengukuran pengamat dalam kerangka *S*, perjalanan bolak-balik *B* dalam kerangka *S'* memerlukan waktu:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad \ldots (9.42)$$

Meskipun kedua pengamat melihat kejadian yang sama, tetapi mereka melihat perbedaan waktu yang diperlukan benda yang dilempar dari kerangka lain untuk melakukan tumbukan dan kemudian kembali ke tempat semula.

Jika persamaan 9.42 kita substitusikan ke persamaan 9.41 akan kita peroleh:

$$v_B = \frac{Y\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}{t_0} \quad \ldots (9.43)$$

Berdasarkan persamaan 9.38, kecepatan benda *A* adalah:

$$v_A = \frac{Y}{t_0}$$

Kedua persamaan ini kita substitusikan ke persamaan 9.40, sehingga kita dapatkan:

$$m_A = m_B\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \quad \ldots (9.44)$$

Pada awal pembahasan ini kita asumsikan bahwa kedua benda adalah identik dalam keadaan diam terhadap pengamat. Pada persamaan 9.44 tampak bahwa ternyata pengukuran massa suatu benda adalah relatif bergantung dari gerak relatif pengamat. Jika v_A dan v_B sangat kecil dibanding dengan kecepatan relatif kerangka acuan maka tidak akan terjadi tumbukan karena $v_B' << v$.

Pada kerangka S akan terukur $m_A = m_0$ dan $m_B = m$. Massa B jika diukur dalam kerangka S adalah:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad \ldots (9.45)$$

Dari persamaan ini dapat disimpulkan bahwa massa benda yang bergerak relatif terhadap pengamat akan menjadi lebih besar dengan koefisien $\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$. Dengan mengingat bahwa $v_B << v$ kita dapat menganggap bahwa benda bergerak relatif terhadap S dengan kecepatan v. Besarnya momentum B jika diukur dalam kerangka A adalah:

$$P = \frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad \ldots (9.46)$$

Contoh Soal

Massa diam elektron adalah $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg. Tentukanlah massa dan momentum relativistik elektron yang bergerak dengan kecepatan 0,9 c!

Penyelesaian:

Diketahui: $m_0 = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg

$v = 0{,}9\ c$

Ditanyakan: $m = \ldots ?$

$P = \ldots ?$

Jawab:

Massa relativistik elektron

$$m = \frac{9{,}1 \cdot 10^{-31}}{\sqrt{1-\frac{0{,}81c^2}{c^2}}} = 2{,}09 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$$

Momentum relativistik

$P = m \cdot v = 2{,}09 \cdot 10^{-30} \cdot 0{,}9 \cdot 3 \cdot 10^8 = 5{,}636 \cdot 10^{-22}$ kg.m/s

J. Energi Relativistik

Dalam mekanika klasik kita ketahui bahwa besarnya usaha yang dilakukan oleh gaya pada suatu benda sebanding dengan perubahan energi kinetiknya. Pada teori relativitas, pendekatan yang sama juga dilakukan dalam menghitung energi kinetik suatu partikel untuk mempercepatnya dari keadaan diam.

$$E_k = \int_0^v F\,ds = \int_0^v \frac{dp}{dt}\,ds$$

$$E_k = \int_0^v v\,dP = \int_0^v v\,d\,\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad \ldots (9.47)$$

dalam hal ini

$$d\left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\right) = m\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{3}{2}} dv \qquad \ldots (9.48)$$

Jika persamaan 9.48 kita substitusikan ke persamaan 9.47 akan kita peroleh:

$$E_k = \int_0^v m_0\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right) v\,dv$$

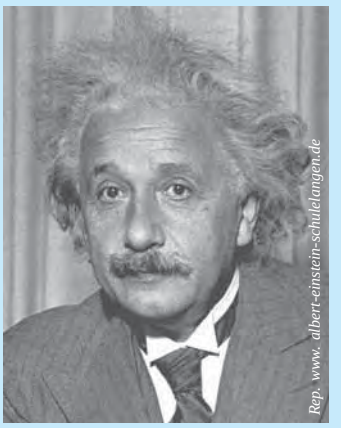
$$E_k = m_0 c^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1\right)$$

atau

$$E_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 \qquad \ldots (9.49)$$

Sebaiknya Tahu

Albert Einstein



Gambar 9.7 Albert Einstein

Albert Einstein lahir di Ulm, Jerman 14 Maret 1879 dan menghabiskan masa mudanya di Munich.

Penemuannya yang mengemparkan dunia adalah kesetaraan massa energi yang dikenal dengan rumus $E = mc^2$. Rumus ini mengilhami pembuatan bom atom yang sempat memporak-porandakan Jepang pada akhir perang dunia kedua.

Hadiah Nobel justru ia peroleh dari teorinya tentang efek fotolistrik pada tahun 1905. Ia meninggal pada tahun 1955 di Amerika Serikat.

Persamaan 9.49 dapat kita tuliskan sebagai:

$$E = E_k + m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad \ldots (9.50)$$

Energi Relativistik Total

Dengan E adalah energi relativistik total yang didefinisikan sebagai jumlah energi kinetik dan energi diamnya. Kesetaraan massa dengan energi diam partikel dirumuskan:

$$E_0 = m_0c^2 \quad \ldots (9.51)$$

Besaran E_0 menunjukkan bahwa besarnya energi diam sebanding dengan kuadrat kecepatan cahaya. Artinya, kita dapat mengubah suatu massa menjadi energi yang luar biasa dahsyat. Melalui rekayasa teknologi, kita akan mendapatkan cadangan energi alternatif yang sangat besar. Sehingga tidak perlu khawatir akan terbatasnya cadangan energi dari minyak bumi dan gas. Hal ini akan kita pelajari lebih mendalam nanti pada pembahasan mengenai inti atom dan radioaktivitas.

Persamaan 9.50 dapat kita modifikasi menjadi:

$$pc^2 = \frac{m_0c^2v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = E\,v \text{ atau } \frac{v}{c} = \frac{pc}{E} \quad (9.52)$$

Agar kamu lebih memahami materi di atas, pelajarilah latihan soal berikut ini kemudian kerjakan pelatihan di bawahnya!

Contoh Soal

Berapakah energi yang dihasilkan oleh 100 gram uranium jika kita mampu mengubah massa menjadi energi listrik seluruhnya? Kita anggap bahwa rumah tangga setiap hari membutuhkan energi listrik 10 kWh. Berapa rumah tangga dapat terpenuhi kebutuhan energi listrik setiap harinya?

Penyelesaian:

Energi yang dihasilkan adalah:

$E = m_0c^2 = 0{,}1 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 9 \cdot 10^{15}$ joule

Jumlah keluarga yang terpenuhi kebutuhan energi listriknya adalah:

$$N = \frac{9 \cdot 10^{15}}{10^4 \cdot 3.600} = 2{,}5 \cdot 10^8 \text{ keluarga}$$

Kerja Berpasangan

Kerjakan bersama teman sebangkumu!

1. Buktikan bahwa perumusan energi kinetik relativistik partikel yang bergerak dengan kecepatan rendah sama dengan energi kinetik klasik!
2. Partikel *P* yang bermassa 3 *m* bergerak dengan kecepatan 0,8 *c* menumbuk partikel *Q* yang bermassa 2 *m*. Jika partikel *Q* semula diam dan tumbukan yang terjadi tidak bersifat elastis, berapa kecepatan akhir kedua partikel tersebut?
3. Massa diam sebuah elektron adalah $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg. Tentukan massa dan momentum relativistik elektron yang bergerak dengan kecepatan 0,7 *c*.

Rangkuman

1. Berdasarkan konsep fisika modern tidak ada gerak suatu benda yang bersifat mutlak. Artinya, gerak benda bergantung pada kerangka acuannya. Demikian pula dengan besaran-besaran dalam mekanika. Hukum-hukum dalam mekanika bersifat konsisten, artinya berlaku untuk semua kerangka acuan.
2. Kerangka inersia adalah suatu kerangka acuan di mana hukum-hukum kelembaman Newton berlaku.
3. Transformasi Galileo menggunakan landasan konsep fisika klasik (fisika Newton). Persamaan-persamaan dalam transformasi Galileo antara lain:

$$x' = x - vt$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$v_x' = v_x - v$$
$$v_y' = \frac{dy'}{dt} = \frac{dy}{dt} = v_y$$
$$v_z' = \frac{dz'}{dt} = \frac{dz}{dt} = v_z$$
$$a_x' = \frac{dv_x'}{dt} = \frac{dv_x}{dt} = a_x$$
$$a_y' = \frac{dv_y'}{dt} = \frac{dv_y}{dt} = a_y$$
$$a_z' = \frac{dv_z'}{dt} = \frac{dv_z}{dt} = a_z$$

4. Persamaan dalam transformasi Lorentz mengacu pada konsep fisika relativistik, yaitu:

$$x' = k\,(x - vt)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$k = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$
$$t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

5. Aturan penjumlahan kecepatan pada fisika relativistik adalah:

$$v_x = \frac{v_x' + v}{1+\frac{v_x' v}{c^2}}$$

6. Kontraksi panjang adalah peristiwa di mana ukuran panjang akan terkesan lebih pendek jika diukur dari titik acuan diam yang bergerak relatif terhadap benda.

$$L = L_o\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

7. Dilatasi waktu adalah peristiwa di mana waktu akan berjalan lebih lambat jika dilihat dari acuan yang bergerak relatif terhadap kerangka acuan diam.

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

8. Besarnya massa relativistik dirumuskan sebagai:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

9. Momentum relativistik dinyatakan sebagai:

$$P = \frac{m_0 v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

10. Energi relativistik dirumuskan sebagai:

$$E = E_k + m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Soal-soal Uji Kompetensi

A. *Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!*

1. Sebuah pesawat penjelajah bergerak terhadap pengamat di bumi pada arah horizontal dengan kecepatan 0,8 *c*. Pesawat tersebut melepaskan roket searah gerak pesawat dengan kecepatan 0,4 *c* terhadap pesawat. Menurut pengamat di bumi kecepatan roket tersebut adalah . . . .
   a. 1,2 *c*
   b. *c*
   c. 0,9 *c*
   d. 0,8 *c*
   e. 0,4 *c*
2. Sebuah roket pada keadaan diam memiliki panjang 10 meter. Jika roket bergerak dengan kecepatan 0,6 *c* terhadap pengamat maka panjang roket tersebut menurut pengamat adalah . . . .
   a. 10 meter
   b. 8 meter
   c. 6 meter
   d. 4 meter
   e. 2 meter
3. Garis tengah suatu asteroid menurut seorang pilot pesawat yang bergerak dengan kecepatan 0,6 c adalah 8 km. Menurut pengamat yang diam terhadap asteroid tersebut, garis tengahnya adalah . . . .
   a. 10 km
   b. 12 km
   c. 14 km
   d. 6 km
   e. 18 km
4. Ada dua orang *A* dan *B*. *A* mengendarai pesawat mata-mata ultracepat dengan kecepatan 0,6 *c* terhadap *B* yang diam di bumi. Selang $3{,}4 \cdot 10^{-6}$ sekon menurut *A* sejak ia meninggalkan *B* di bumi terjadi ledakan pada jarak 100 meter. Menurut *B* yang ada di bumi ledakan tersebut terjadi setelah . . . .
   a. $2{,}0 \cdot 10^{-6}$ detik
   b. $3{,}75 \cdot 10^{-6}$ detik
   c. $4{,}0 \cdot 10^{-6}$ detik
   d. $4{,}2 \cdot 10^{-6}$ detik
   e. $4{,}5 \cdot 10^{-6}$ detik
5. Massa diam suatu benda adalah 2,0 kg. Massa benda tersebut ketika bergerak dengan kecepatan 0,6 *c* adalah . . . .
   a. 2,5 kg
   b. 3,0 kg
   c. 3,5 kg
   d. 4,0 kg
   e. 4,5 kg
6. Massa suatu benda menjadi 125 persen masa diamnya. Kecepatan benda tersebut pada saat itu adalah . . . .
   a. 1,25 *c*
   b. *c*
   c. 0,8 *c*
   d. 0,6 *c*
   e. 0,5 *c*
7. Energi relativistik total yang dimiliki suatu benda adalah . . . .
   a. energi kinetik + energi diam
   b. energi kinetik – energi diam
   c. energi diam – energi kinetik
   d. energi diam : energi kinetik
   e. sama dengan energi diamnya
8. Sebuah benda dengan massa diam 1 kg memiliki momentum relativistik sebesar $2{,}25 \cdot 10^{8}$ kg.m/s. Jika laju cahaya $3 \cdot 10^{8}$ m/s maka kecepatan benda pada saat itu adalah . . . .
   a. $0{,}6 \cdot 10^{8}$ m/s
   b. $1{,}2 \cdot 10^{8}$ m/s

c. $1{,}8 \cdot 10^8$ m/s
d. $2{,}4 \cdot 10^8$ m/s
e. $3{,}0 \cdot 10^8$ m/s

9. Diasumsikan kita mampu mengubah seluruh batu bara menjadi energi dan untuk mendidihkan setiap liter air dibutuhkan $3{,}0 \cdot 10^5$ joule. Banyaknya air yang dapat dididihkan oleh 1 kg batubara adalah . . . .
   a. $3 \cdot 10^{11}$ kilo liter
   b. $3 \cdot 10^{10}$ kilo liter
   c. $3 \cdot 10^9$ kilo liter
   d. $3 \cdot 10^8$ kilo liter
   e. $3 \cdot 10^7$ kilo liter
10. Konsep transformasi relatitivistik memberikan konsekuensi berikut ini, **kecuali** . . . .
   a. tinjauan ulang terhadap konsistensi hukum-hukum mekanika Newton
   b. tinjauan ulang terhadap konsep keabsolutan waktu
   c. tinjauan ulang terhadap konsep cahaya
   d. tinjauan ulang terhadap massa dan energi
   e. tinjauan ulang terhadap konsep ruang dan waktu

B. *Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!*

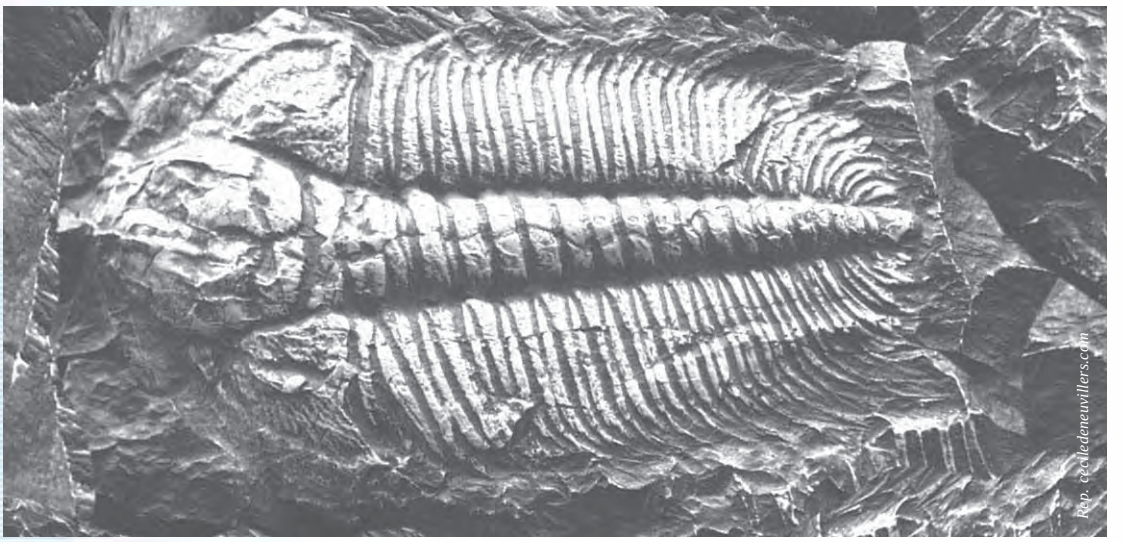
1. Suatu partikel bergerak di atas kereta api yang sedang bergerak pada lintasan rel yang lurus dengan kecepatan konstan 72 km/jam terhadap stasiun. Suatu benda bergerak menyeberangi gerbong yang lebarnya 2,5 m dengan kecepatan 1 m/s. Dengan menggunakan transformasi Galileo, tentukanlah:
   a. persamaan kedudukan benda terhadap stasiun,
   b. jika dianggap tepat di depan stasiun benda mulai bergerak, tentukanlah kedudukan benda terhadap stasiun ketika benda tepat di seberang.
2. Seorang astronaut mengendarai pesawat penjelajah angkasa dengan kecepatan konstan meninggalkan bumi. Dalam perjalanan ia bertemu sebuah benda asing yang bergerak dengan kecepatan 0,7 *c* menuju bumi. Jika saat itu ia bergerak dengan kecepatan 0,8 *c* terhadap bumi, berapakah kecepatan benda asing tersebut terhadap pengamat di bumi?
3. Jika massa suatu benda adalah *a*, kecepatan benda adalah *b* dan laju cahaya adalah *c*, tentukanlah kecepatan benda dalam *c* jika pada saat itu energi kinetik benda sama dengan 1,5 kali energi diamnya!
4. Dua anak kembar Rudi dan Robi. Ketika mereka berusia 30 tahun, Rudi pergi ke luar angkasa dengan kecepatan 0,6 *c*. Jika menurut Rudi ia pergi selama 10 tahun, berapa usia mereka menurut masing-masing?
5. Seorang astronaut melihat benda angkasa yang berbentuk bola mempunyai diameter 4 m. Jika benda tersebut bergerak dengan kelajuan 0,8 *c*. Berapa volume benda angkasa menurut astronaut tersebut?

BAB

10

INTI ATOM DAN RADIOAKTIVITAS

Gerbang



Gambar 10.1 Umur fosil dapat diperkirakan dengan memanfaatkan radioaktivitas

Fosil *trilobite* pada gambar di atas diketahui telah berumur 250 juta tahun. Bagaimana kita dapat mengetahui umur fosil yang telah mati jutaan tahun lamanya? Penentuan umur fosil merupakan salah satu penerapan radioaktivitas yang melibatkan atom dan inti atom. Seberapa penting pengetahuan tentang inti atom bagi kita? Pada bab ini akan kita pelajari lebih jauh tentang struktur dan karakter inti atom.

Kata Kunci: Inti Atom – Energi Ikat Inti – Gaya Inti – Radioaktivitas – Waktu Paruh – Reaksi Inti – Reaksi Fisi – Reaksi Fusi

A. Inti Atom

Inti Atom

Pada pelajaran sebelumnya kita telah mempelajari atom. Jika kita meneliti lebih jauh ke dalam atom maka pada pusat atom terdapat inti atom. Inti atom merupakan bagian penting untuk mengungkap lebih jauh tentang atom. Inti atom dianggap sebagai partikel yang memiliki massa dan bermuatan positif. Berikut ini akan kita pelajari hal-hal yang berkaitan dengan inti atom.

1. Struktur Inti Atom

Inti atom memiliki diameter sekitar 10^{-15} m atau kurang lebih $\frac{1}{100.000}$ kali ukuran atom. Inti atom atau *nukleus* tersusun atas nukleon-nukleon, yaitu proton dan neutron yang terikat sangat kuat. Banyaknya proton di dalam inti dinyatakan dengan Z (nomor atom) dan banyaknya neutron di dalam inti dinyatakan dengan N. Banyaknya proton dan neutron di dalam inti dinyatakan dengan A (nomor massa).

Secara matematis, dapat dirumuskan:

$A = Z + N$

Nomor atom dan nomor massa suatu atom biasanya disertakan dalam penulisan simbol atom. Kaidah penulisan simbol atom yang lazim digunakan adalah: ${}^{A}_{Z}X$.

Misalnya inti karbon-12 disimbolkan sebagai ${}^{12}_{6}C$, ini berarti inti tersebut terdiri atas 6 proton dan 6 neutron.

Selain menunjukkan banyaknya proton dan neutron dalam suatu atom, nomor massa juga menunjukkan massa inti atom tersebut. Massa inti atom dinyatakan dalam satuan massa atom (sma). 1 sma didefinisikan sebagai $\frac{1}{12}$ kali massa inti atom karbon yaitu $1{,}6604 \cdot 10^{-27}$ kg. Dengan menggunakan rumus $E = m \cdot c^2$, 1 sma akan setara dengan $9{,}31 \cdot 10^{8}$ eV atau 931 MeV. Penentuan massa inti atom dapat dilakukan dengan menggunakan alat yang disebut spektograf massa. Dengan alat ini terukur massa proton dan massa neutron masing-masing adalah:

massa proton (${}^{1}_{1}H$) = 1,007825 sma

massa neutron (${}^{1}_{0}n$) = 1,008665 sma

Inti atom terkonsentrasi dalam pusat atom dengan jari-jari:

$$R = R_0 (A)^{\frac{1}{3}} \qquad \ldots \quad (10.1)$$

Keterangan:

R_0 : konstanta yang besarnya 1,1 fermi (1 fermi = 1 femtometer = 10^{-15} m)

A : nomor massa

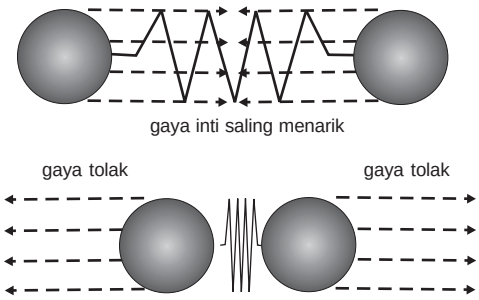
2. Gaya Inti

Di dalam inti atom terdapat banyak proton yang bermuatan positif. Jarak antarproton dalam inti atom sangat berdekatan karena ukuran inti atom sangat kecil. Menurut hukum Coulumb gaya tolak antarproton sangat besar dan gaya gravitasi antarproton tidak cukup kuat untuk melawan gaya tersebut. Oleh karena itu, diperlukan suatu gaya tersendiri yang dapat mengikat inti atom. Gaya ini bekerja pada daerah jangkauan yang sangat pendek (antara $0{,}6 \cdot 10^{-15} - 2 \cdot 10^{-15}$m). Gaya tersebut disebut gaya inti.

Gaya Inti

Salah satu teori tentang gaya inti diusulkan oleh Hideki Yukawa seorang fisikawan Jepang pada awal tahun 1930. Teori Yukawa dikenal dengan teori meson gaya nuklir. Menurut Yukawa setiap nukleon terus-menerus memancarkan dan menyerap pion. Jika terdapat nukleon lain didekatnya maka pion yang dipancarkan dapat menyeberang bolak-balik kembali ke induknya disertai pertukaran momentum yang setara dengan aksi gaya.

Gaya inti akan tolak-menolak pada jarak yang lebih pendek dari jarak tertentu, hal ini agar nukleon dalam inti tidak menyatu. Mungkin kita dapat mengilustrasikan gaya inti ini sebagai dua buah bola yang dihubungkan dengan sebuah pegas. Pada jarak yang sangat dekat, kedua bola akan saling menolak, tetapi pada jarak yang jauh kedua bola akan saling menarik.



Gambar 10.2 Ilustrasi sederhana gaya pada inti atom

3. Energi Ikat Inti

Energi Ikat Inti

Gaya inti antarpartikel inti menimbulkan energi ikat inti. Energi ikat inti (*binding energy*) adalah energi yang diperlukan untuk melepaskan partikel-partikel penyusun inti menjadi partikel-partikel yang terpisah. Energi ini dapat dihitung dengan menggunakan selisih antara jumlah massa partikel-partikel penyusun inti dengan massa inti. Selisih ini disebut sebagai defek massa, yang dirumuskan sebagai berikut.

$$\Delta m = \{Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n\} - m_i \quad \ldots \quad (10.2)$$

Keterangan:

Δm : defek massa (sma)
Z : nomor atom
m_p : massa proton (sma)
m_n : massa neutron (sma)
m_i : massa inti (sma)

Besarnya energi ikat inti jika Δm dinyatakan dalam kg adalah:

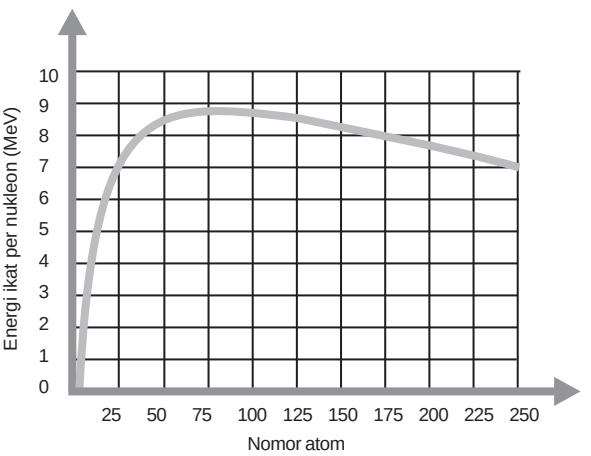
$$E_i = \Delta m \cdot c^2 \quad \ldots \quad (10.3)$$

Jika Δm dinyatakan dalam sma, besarnya energi ikat inti adalah:

$$E_i = \Delta m \cdot 931\text{MeV} \quad \ldots \quad (10.4)$$

Persamaan di atas berlaku untuk seluruh inti atom. Seperi telah kita ketahui, inti atom terdiri atas nukleon-nukleon. Masing-masing nukleon juga memiliki energi ikat. Besarnya energi ikat per nukleon dinyatakan sebagai $\frac{E_i}{A}$. Gambar 10.2 menunjukkan grafik energi ikat per nukleon pada inti atom.

Dari gambar 10.2 terlihat bahwa untuk inti-inti dengan nomor atom besar energi ikatnya semakin kecil. Untuk lebih jelasnya perhatikan contoh soal berikut!



Gambar 10.3 Grafik energi ikat per nukleon

Contoh soal

Tentukanlah energi ikat inti dan energi ikat per nukleon inti Litium ($^{7}_{3}$Li), jika massa inti Li = 7,01822 sma!

Penyelesaian:

Diketahui: m_i = 7,01822 sma

Ditanyakan: E_i = . . .?

Jawab:

Energi ikat inti $^{7}_{3}$Li

E_i = {(3 · 1,007825 + 4 · 1,008665) – 7,01822} · 931 MeV =37,105005 MeV

Energi ikat per nukleon $^{7}_{3}$Li

$$\frac{E_i}{A} = \frac{37{,}105005}{7} = 5{,}300715 \text{ MeV}$$

Dari contoh soal di atas dapat kita ketahui bahwa untuk memisahkan seluruh proton dan neutron penyusun inti Li dari atomnya diperlukan energi sekitar 37,1 MeV. Sedangkan untuk memisahkan satu proton dan satu neutron dari ikatan inti atom Li diperlukan energi sekitar 5,3 MeV. Dapat kita bayangkan betapa besarnya energi yang dibutuhkan untuk mencerai-beraikan 1 gram Li agar seluruh partikelnya terlepas dari atomnya. Untuk menguji pemahamanmu tentang pembahasan di atas kerjakan soal-soal berikut!

Kerja Mandiri 1

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

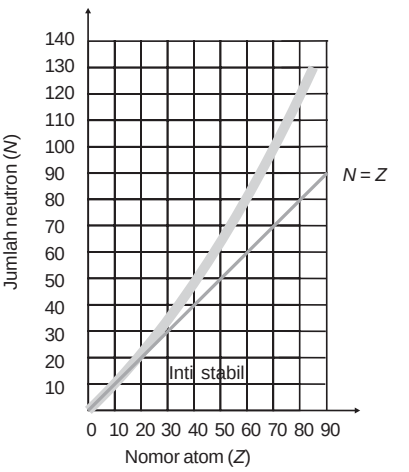
Tentukan massa inti dari unsur-unsur berikut!

1. $^{31}_{15}$P jika $\frac{E_i}{A}$ = 8,48 Mev
2. $^{81}_{35}$Br jika $\frac{E_i}{A}$ = 8,69 Mev
3. $^{120}_{50}$Sn jika $\frac{E_i}{A}$ = 8,50 Mev

4. Stabilitas Inti

Beberapa inti atom dapat bertranformasi secara spontan menjadi inti atom lain. Hal ini disebabkan oleh sifat stabilitas inti. Stabilitas suatu inti ditentukan oleh perbandingan antara jumlah neutron dengan jumlah proton. Inti-inti ringan (A < 20) akan stabil jika jumlah proton sama dengan jumlah neutron. Akan tetapi, untuk inti-inti berat proporsi neutron akan lebih besar.

Seperti telah kita ketahui bahwa gaya inti bekerja pada jangkauan yang sangat kecil, yaitu hanya bekerja antara atom-atom yang berdekatan, sedangkan jangkauan gaya Coulomb tidak terbatas. Gaya tolak antarproton akibat gaya Coulomb bekerja pada jarak yang tidak terjangkau oleh gaya inti. Hal ini mengakibatkan inti-inti berat dengan jumlah proton (Z) besar memiliki gaya tolak yang lebih besar dari gaya inti, sehingga inti-inti berat tidak stabil. Berdasarkan hasil eksperimen, inti berat yang paling stabil adalah bismut. Inti-inti berat dengan $Z > 80$ akan cenderung mejadi inti stabil dengan melepaskan proton atau menangkap neutron.



Gambar 10.4 Grafik stabilitas inti

Di alam terdapat sekitar 300 kombinasi ikatan proton dan neutron dalam keadaan stabil. Para ilmuwan sudah dapat menghasilkan sekitar 3.000 inti buatan di dalam laboratorium. Sebagian besar inti ini dalam keadaan tidak stabil, karena adanya kelebihan proton atau neutron. Inti-inti tidak stabil akan mengalami proses menuju inti stabil yang dikenal dengan proses peluruhan radioaktif atau radioaktivitas.

B. Radioaktivitas

Radioaktivitas

Radioaktivitas adalah gejala terpancarnya partikel-partikel radioaktif akibat peluruhan (disintegrasi) inti dalam rangka menuju inti stabil. Inti-inti yang mengalami peluruhan ini disebut inti radioaktif.

Gejala radioaktivitas ditemukan secara tidak sengaja oleh Henri Becquerel, seorang fisikawan berkebangsaan Prancis pada tahun 1896. Ketika ia meletakkan pelat film di sekitar uranium, pelat film tersebut kemudian menjadi hitam. Gejala fosforesensi (*phosporesence*) dan fluoresensi (*fluoresence*) tidak dapat menjawab fenomena penyebab penghitaman pelat film di sekitar uranium. Akhirnya, Becqeurel berkesimpulan bahwa penyebabnya adalah sinar yang dipancarkan secara spontan oleh uranium. Sinar ini kemudian disebut sebagai sinar radioaktif. Sedangkan unsur-unsur yang memancarkan sinar radioaktif disebut unsur radioaktif.

Dari hasil penelitian selanjutnya terdapat tiga sinar radioaktif yaitu sinar alfa (α), sinar beta (β), dan sinar gamma (γ). Selain menghitamkan pelat film, ketiga sinar tersebut memiliki sifat-sifat sebagai berikut.

1. Sinar alfa (α)

a. Sinar alfa bermuatan positif (2+).

b. Dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnet.

c. Memiliki daya tembus yang paling rendah dibandingkan sinar beta maupun gamma.

2. Sinar beta (β)

a. Sinar beta bermuatan negatif (1–).

b. Dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnet.

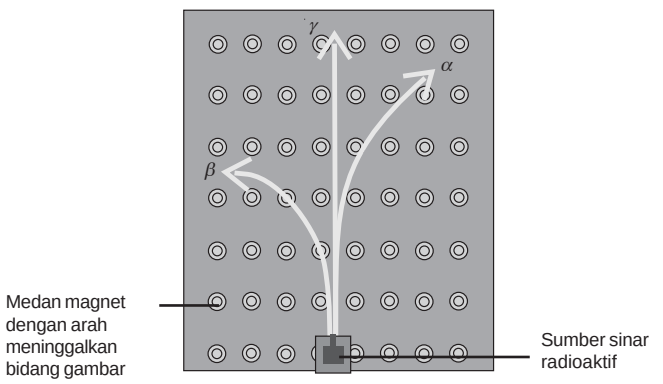
c. Memiliki daya tembus yang lebih besar dari sinar alfa, tetapi di bawah sinar gamma.

3. Sinar gamma (γ)

a. Sinar gamma tidak bermuatan sehingga tidak dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnet.

b. Sinar gamma memiliki daya tembus yang paling kuat di antara ketiga sinar radioaktif yang ada.

Perhatikan gambar 10.6 di bawah ini! Gambar 10.6 menunjukkan pembelokan sinar radioaktif di dalam medan magnetik. Perhatikan bahwa partikel alfa dan beta adalah partikel bermuatan! Ingat kembali konsep gaya Lorentz pada partikel bermuatan!



Gambar 10.6 Pembelokan sinar radioaktif dalam medan magnetik

Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa sinar alfa, beta, dan gamma termasuk sinar radioaktif. Demikian halnya dengan partikel-partikel radioaktif lain, sinar-sinar tersebut juga mengalami peluruhan. Mekanisme peluruhan sinar-sinar radioaktif dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Peluruhan alfa

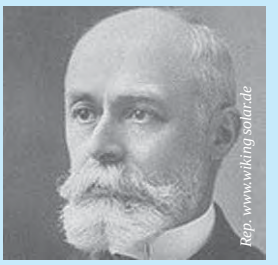
Sinar alfa sering disimbolkan dengan ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$. Dengan demikian, ketika suatu inti memancarkan sinar alfa, inti induk akan kehilangan dua proton dan dua neutron. Misalnya inti *X* dengan nomor atom *Z* dan nomor massa *A* memancarkan sinar alfa dan menghasilkan inti baru yaitu *Y*. Mekanisme peluruhannya dapat dituliskan sebagai:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-2}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}\mathrm{He} $$

Peluruhan alfa merupakan peluruhan yang memancarkan energi. Energi yang dipancarkan pada peluruhan alfa adalah:

$$ E = (m_x - m_y - m_\alpha)\, c^2 $$

Sebaiknya Tahu



Gambar 10.5 Antoine Henri Becquerel

Antoine Henri Becquerel (1852–1908)

Fisikawan Prancis ini adalah pemenang hadiah nobel di bidang fisika atas penemuannya dalam radio-aktivitas pada uranium.

Ketika ia akan melakukan penyelidikan tentang ke-mungkinan bahan fluo-resensi memancarkan sinar-X jika disinari, ia menemukan radioaktivitas pada uranium.

Berawal dari ketidak-sengajaan ini ia terus melanjutkan penelitiannya terhadap berbagai aspek radioaktivitas uranium hingga akhir hayatnya. Ia menerima hadiah Nobel di bidang fisika pada tahun 1903.

Energi yang dipancarkan pada peluruhan alfa merupakan energi kinetik inti anak (inti *Y*) dan sinar alfa. Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$E = (E_{ky} - E_{k\alpha})\, c^2$$

Energi kinetik inti anak dan sinar alfa pada peluruhan alfa lebih kecil dibandingkan energi diam inti anak dan alfa. Dengan menggunakan mekanika klasik, diperoleh energi kinetik sinar alfa:

$$E_{k\alpha} = \frac{A-4}{A} \cdot E$$

2. Peluruhan beta

Pada peluruhan beta, neutron mengalami transformasi menjadi proton dan elektron. Elektron yang meninggalkan inti atom akan terdeteksi sebagai sinar beta. Dengan demikian, nomor atom inti anak akan berselisih satu satuan dibandingkan nomor atom inti induk. Mekanisme peluruhannya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}Y + \beta + \nu$$

Keterangan:

ν : neutrino

Peluruhan beta jika dinyatakan sebagai perubahan neutron menjadi proton dapat dituliskan sebagai:

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + \nu$$

Peluruhan beta di atas merupakan peluruhan beta utama. Peluruhan beta ada dua macam, yaitu peluruhan beta utama dan peluruhan beta positif (elektron positif atau positron). Dalam peluruhan beta positif, proton berubah menjadi neutron dan memancarkan sebuah positron. Mekanisme peluruhannya adalah:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}Y + \beta + \nu$$

Perubahan proton menjadi neutron hanya dapat terjadi di inti. Mekanisme peluruhannya dapat dituliskan sebagai:

$$^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

Peluruhan beta juga menghasilkan energi. Energi yang dihasilkan pada peluruhan beta utama dapat dirumuskan:

$$E = (m_x - m_y - m_\alpha)\, c^2$$

Sedangkan energi pada peluruhan beta positif dapat dirumuskan:

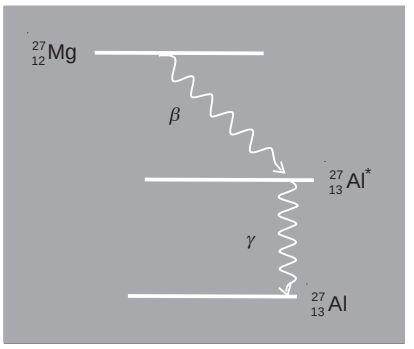
$$E = (m_x - m_y - 2m_\alpha)\, c^2$$

3. Peluruhan gamma

Pada peluruhan gamma, inti induk tidak mengalami perubahan, tetapi pada proses ini dipancarkan energi yang tinggi. Mekanisme peluruhannya adalah:

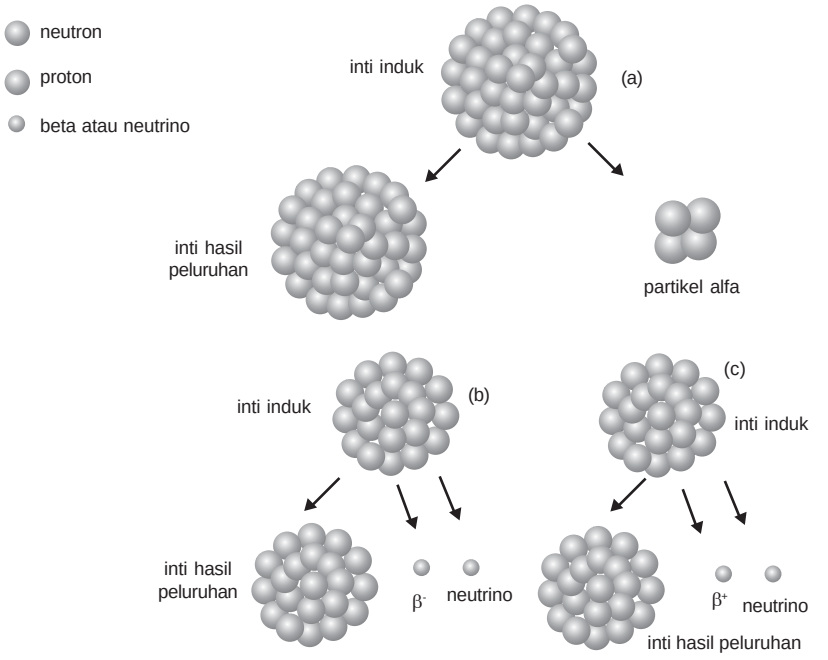
$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z}Y + {}^{0}_{0}\gamma + energi $$

Peluruhan sinar gamma terjadi jika inti berada dalam keadaan energi ikat yang lebih tinggi dari keadaan dasarnya. Inti dalam keadaan seperti ini dikatakan dalam keadaan tereksitasi dan diberi tanda bintang (*) setelah simbol intinya. Inti yang tereksitasi akan kembali ke keadaan dasarnya dengan memancarkan foton yang besarnya mencapai beberapa MeV. Gambar 10.7 menunjukkan mekanisme peluruhan ${}^{27}_{12}Mg$ menjadi ${}^{27}_{13}Al$.



Gambar 10.7 Mekanisme peluruhan sinar gamma

Ilustrasi peluruhan sinar-sinar radioaktif di atas dapat kita lihat pada gambar 10.8 berikut ini!



Gambar 10.8 (a) peluruhan sinar alfa, (b) peluruhan beta negatif, dan (c) peluruhan beta positif

Proses peluruhan radioaktif seperti pembahasan di atas akan terus berlangsung hingga dihasilkan inti yang stabil. Laju peluruhan inti radioaktif disebut sebagai aktivitas radioaktif yang besarnya dirumuskan sebagai berikut.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \qquad \ldots \ (10.5)$$

Keterangan:

$\frac{dN}{dt}$: laju peluruhan inti (peluruhan/sekon)

λ : konstanta peluruhan

Besaran λN dikenal sebagai aktivitas radioaktif dan disimbolkan dengan R. Satuan untuk R dalam SI dinyatakan dalam becquerel (Bq), 1 Bq = 1 peluruhan/sekon. Pada kenyataannya aktivitas radioaktif sangat tinggi. Sehingga digunakan satuan lain, yaitu curie (Ci) 1 Ci = $2{,}70 \cdot 10^{10}$ Bq.

Aktivitas radioaktif menyebabkan perbedaan jumlah partikel sebelum dan sesudah peluruhan. Hubungan antara jumlah partikel sebelum dan sesudah peluruhan dapat ditentukan dengan mengintegralkan persamaan 10.5. Dengan demikian, diperoleh hubungan sebagai berikut.

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad \ldots \ (10.6)$$

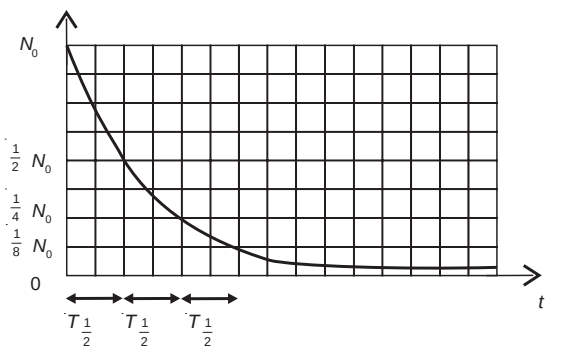
Keterangan:

N : jumlah partikel sisa yang belum meluruh

N_0 : jumlah partikel awal

t : selang waktu

Perhatikan gambar 10.9!



Gambar 10.9 Grafik hubungan N dengan T pada peluruhan radioaktif

Gambar 10.9 menunjukkan hubungan antara N dan t. Dari gambar diketahui bahwa setiap selang waktu $T_{\frac{1}{2}}$, sisa partikel yang belum meluruh tinggal separuh sebelumnya. Selang waktu yang diperlukan sehingga aktivitas radioaktif tinggal separuh aktivitas awal disebut waktu paruh dan disimbolkan sebagai $T_{\frac{1}{2}}$. Untuk menghitung waktu paruh dapat kita gunakan cara berikut.

Waktu Paruh

Kita misalkan jika $t = 0$, $N = N_0$ maka setelah $t = T_{\frac{1}{2}}$, $N = \frac{1}{2}N_0$. Dengan demikian, persamaan 10.6 akan menjadi:

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda T_{\frac{1}{2}} \ln e$$

$$\ln 2 = -\lambda T_{\frac{1}{2}}$$

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda} \quad \ldots (10.7)$$

Jika $T_{\frac{1}{2}}$ diketahui, dengan menggunakan grafik pada gambar 10.9 kita dapat menuliskan hubungan N dengan N_0 sebagai berikut.

$$N = N_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}} \quad \ldots (10.8)$$

Aktivitas radioaktif sebanding dengan banyaknya partikel. Dengan demikian, kita dapat menuliskan hubungan R dengan R_0 sebagai berikut.

$$R = R_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}} \quad \ldots (10.9)$$

Perhatikan contoh soal berikut! Selanjutnya, untuk menguji pemahamanmu tentang pembahasan di atas, kerjakanlah pelatihan di bawahnya!

Contoh Soal

10 gram sampel bahan radioaktif dengan waktu paruh 10 hari disimpan dalam suatu wadah yang terisolasi. Berapakah sisa sampel tersebut yang belum meluruh setelah 1 bulan? (anggap 1 bulan = 30 hari)

Penyelesaian:

Diketahui:

M_0 = 10 gram

$T_{\frac{1}{2}}$ = 10 hari

Ditanyakan: M = . . .?

Jawab:

Massa benda sebanding dengan jumlah partikel sehingga:

$$M = M_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}} = 10\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{30}{10}} = 10\left(\frac{1}{2}\right)^3 = 1{,}25 \text{ gram}$$

Kerja Mandiri 2

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

1. Waktu paruh suatu zat radioaktif adalah 30 hari. Tentukan persentase inti yang tersisa setelah meluruh selama 75 hari!
2. Berapa lama waktu yang diperlukan untuk meluruhkan 100 gram zat radioaktif menjadi 12,5 gram jika waktu paruh zat tersebut 15 hari?

Pada beberapa peluruhan inti radioaktif, inti tidak stabil akan meluruh beberapa kali sehingga membentuk suatu deret. Deret ini disebut deret radioaktif. Deret radioaktif ada 4 macam, yaitu:

1. Deret Thorium dengan inti induk $^{232}_{90}Th$ dan waktu paruh $1{,}39 \cdot 10^{10}$ tahun, inti stabilnya adalah $^{208}_{80}Pb$. Deret ini memiliki nomor massa (A) sama dengan $4n$.
2. Deret Neptunium dengan inti induk $^{232}_{93}Np$ dan waktu paruh $2{,}25 \cdot 10^{6}$ tahun, inti stabilnya adalah $^{209}_{83}Pb$. Deret ini memiliki nomor massa (A) sama dengan $4n + 1$.
3. Deret Uranium dengan inti induk $^{238}_{92}U$ dan waktu paruh $4{,}51 \cdot 10^{9}$ tahun, inti stabilnya adalah $^{206}_{82}Pb$. Deret ini memiliki nomor massa (A) sama dengan $4n + 2$.
4. Deret Aktinium dengan inti induk $^{235}_{92}U$ dan waktu paruh $7{,}07 \cdot 10^{8}$ tahun, inti stabilnya adalah $^{207}_{82}Pb$. Deret ini memiliki nomor massa (A) sama dengan $4n + 3$.

Penerapan Radioaktivitas

Sifat radioaktivitas suatu zat radioaktif dapat dimanfaatkan dalam berbagai bidang. Misalnya untuk mempelajari makhluk hidup, mendiagnosa dan mendeteksi penyakit, mensterilkan peralatan medis dan makanan, dan sebagai sumber energi listrik.

1. *Tracer*

Penerapan radioaktivitas banyak digunakan pada *tracer*. Dengan menggunakan *tracer,* suatu alur reaksi kimia dapat dilacak. *Tracer* biasa digunakan dalam bidang kedokteran dan untuk mempelajari hewan serta tumbuhan. Iodin–131 dapat digunakan untuk mempelajari fungsi kelenjar tiroid dan mendeteksi penyakit pada kelenjar tiroid.

2. Sterilisasi peralatan dan makanan

Penerapan radioaktivitas juga sering digunakan untuk mensterilkan peralatan medis dan makanan. Peralatan medis dan makanan disinari dengan radiasi radioaktif agar mikroorganisme yang menyebabkan kontaminasi dan penyakit dapat dimusnahkan.

3. PLTN

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) menggunakan uranium sebagai bahan bakar. Di dalam PLTN terdapat reaktor nuklir, yaitu tempat terjadinya reaksi inti. Reaksi inti dalam reaktor nuklir menghasilkan uap panas. Uap panas ini digunakan untuk menggerakkan turbin sehingga dihasilkan energi listrik.

Pemanfaatan radioakvitas dalam berbagai bidang akan kita pelajari lebih lanjut pada bab selanjutnya.

Kerja Kelompok

Kerjakan bersama kelompokmu!

Buatlah kliping tentang pemanfaatan sinar-sinar radioaktif dalam kehidupan sehari-hari! Setelah kliping selesai dibuat, diskusikan dengan teman sekelasmu! Selanjutnya, kumpulkan klipingmu untuk disimpan ke perpustakaan sebagai referensi!

C. Reaksi Inti

Reaksi Inti

Inti atom tidak hanya mengalami proses peluruhan radioaktif. Jika inti atom ditembak dengan partikel berenergi tinggi, akan terjadi suatu reaksi inti. Tumbukan antara inti atom dengan partikel penembak akan mengakibatkan terbentuknya inti baru yang berbeda dengan inti asal. Inti baru ini disebut sebagai inti transmutasi.

Reaksi inti pertama dilakukan oleh Rutherford pada tahun1919, ketika ia berhasil menembakkan partikel alfa pada inti nitrogen. Reaksi tersebut menghasilkan isotop oksigen $\left({}^{17}_{8}\mathrm{O}\right)$ dan sebuah proton. Secara matematis dapat dituliskan:

$${}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

Dalam perkembangan selanjutnya, reaksi inti dilakukan dengan menembakkan partikel yang telah dipercepat dalam sebuah akselerator. Di dalam akselerator, partikel dipercepat hingga memiliki energi kinetik yang diinginkan, kemudian ditembakkan pada inti target. Akselerator dikembangkan pertama kali oleh John D Cockcroft dan Ernest Thomas S Walton dari Inggris pada tahun 1930. Dengan akselerator ini mereka berhasil menembakkan proton pada inti lithium $\left({}^{7}_{3}\mathrm{Li}\right)$ yang menghasilkan dua inti helium.

Gambar 10.10 Akselerator yang digunakan untuk mempercepat partikel elementer

Secara matematis dapat dituliskan:

$$^{7}_{3}\text{Li} + ^{1}_{1}\text{H} \rightarrow ^{4}_{2}\text{He} + ^{4}_{2}\text{He}$$

Untuk mempersingkat penulisan, reaksi inti biasanya dituliskan dalam bentuk X (a, b) Y. Sebagai contoh, reaksi inti yang dilakukan oleh Rutherford di atas dapat dituliskan sebagai:

$$^{14}_{7}\text{N}\,(\alpha,\text{p})\,^{17}_{8}\text{O}$$

Di dalam reaksi inti ada beberapa hukum kekekalan yang perlu kita perhatikan. Hukum-hukum tersebut adalah hukum kekekalan jumlah nukleon, hukum kekekalan muatan, hukum kekekalan energi, dan hukum kekekalan momentum.

a. Hukum kekekalan jumlah nukleon

Jumlah nukleon (proton + neutron) sebelum reaksi sama dengan jumlah nukleon sesudah reaksi.

Misalkan pada reaksi

$$^{A1}_{Z1}X + ^{A2}_{Z2}a \rightarrow ^{A3}_{Z3}Y + ^{A4}_{Z4}b$$

dalam hal ini berlaku:

$$A1 + A2 = A3 + A4$$

b. Hukum kekekalan muatan

Jumlah muatan (proton) sebelum dan sesudah reaksi adalah sama. Berdasarkan hukum kekekalan muatan pada reaksi di atas berlaku:

$$Z1 + Z2 = Z3 + Z4$$

c. Hukum kekekalan energi

Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa jumlah energi total (relativistik) sebelum dan sesudah reaksi adalah sama. Energi total adalah jumlah energi kinetik (K) dan energi diamnya (E_0).

Pada reaksi di atas berlaku:

$$(K_X + E_{0X}) + (K_a + E_{0a}) = (K_Y + E_{0Y}) + (K_b + E_{0b})$$
$$(K_Y + E_b) + (K_X + E_a) = (K_{0X} + E_{0a}) + (K_{0Y} + E_{0b})$$
$$(K_Y + E_b) + (K_X + E_a) = \{(m_{0X} + m_{0a}) + (m_{0Y} + m_{0b})\}c^2$$

Keterangan:

K : energi kinetik (MeV)

m_0 : massa diam inti atau partikel (MeV)

Besarnya energi reaksi dirumuskan sebagai:

$$Q = \{(m_{0X} + m_{0a}) + (m_{0Y} + m_{0b})\}c^2 \quad \ldots \quad (10.10)$$

atau

$$Q = (K_Y + E_b) + (K_X + E_a) \quad \ldots \quad (10.11)$$

Jika $Q > 0$ reaksinya disebut reaksi eksotermik. Pada reaksi eksotermik, sistem kehilangan energi massa diamnya tetapi mendapat tambahan energi kinetik. Jika $Q < 0$ reaksinya disebut reaksi endotermik.

d. Hukum kekekalan momentum

Hukum kekekalan momentum menyatakan bahwa jumlah momentum relativistik sebelum reaksi sama dengan jumlah momentum relativistik sesudah reaksi.

$$P_x + P_a = P_y + P_b$$
$$m_x v_x + m_a v_a = m_y v_y + m_b v_b$$

dengan $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$

D. Reaksi Fisi dan Reaksi Fusi

Reaksi yang terjadi pada inti atom ada dua macam, yaitu reaksi fisi dan reaksi fusi. Berikut akan kita pelajari lebih lanjut mengenai kedua reaksi tersebut.

1. Reaksi Fisi

Reaksi Fisi

Reaksi fisi adalah reaksi pembelahan inti berat menjadi inti-inti ringan disertai dengan pelepasan energi. Inti-inti baru hasil reaksi disebut sebagai fragmen fisi. Contoh reaksi fisi yang sering digunakan adalah reaksi pembelahan uranium–235 berikut.

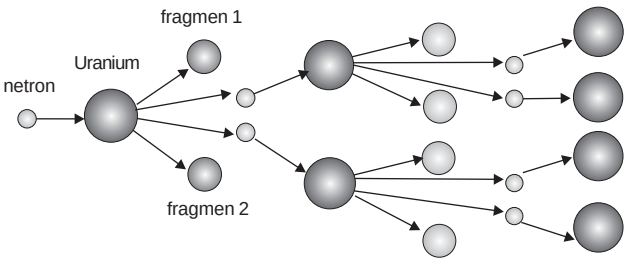
$$^{235}_{92}\text{U} + {}^{1}_{0}\text{n} \rightarrow {}^{236}_{54}\text{Xe} + {}^{94}_{38}\text{Sr} + {}^{1}_{0}\text{n} + {}^{1}_{0}\text{n}$$

Pada proses di atas, uranium–235 tereksitasi setelah menyerap neutron, kemudian uranium membelah.

Selain dengan cara di atas, reaksi fisi juga dapat terjadi dengan cara menembakkan sinar gamma atau proton pada inti target. Beberapa inti tak stabil dapat mengalami reaksi fisi secara spontan. Reaksi ini biasanya didahului dengan peluruhan sinar gamma.

Neutron yang dihasilkan akibat pembelahan pada reaksi fisi dapat menginduksi fisi, sehingga fisi dapat berjalan dengan sendirinya. Jika hal ini berlangsung tanpa kendali maka terjadi reaksi berantai dengan energi yang sangat dahsyat dan mengakibatkan kerusakan yang luar biasa, seperti pada ledakan bom atom. Karena pada reaksi fisi dilepaskan energi yang sangat besar yaitu sekitar 200 MeV untuk setiap reaksi fisi yang terjadi.

Gambar 10.11 Ledakan bom dengan hulu ledak nuklir hasil uji coba di Nevada Amerika Serikat sekitar tahun 1951 dan 1962



Gambar 10.12 Ilustrasi terjadinya reaksi fisi berantai

2. Reaksi Fusi

Reaksi Fusi

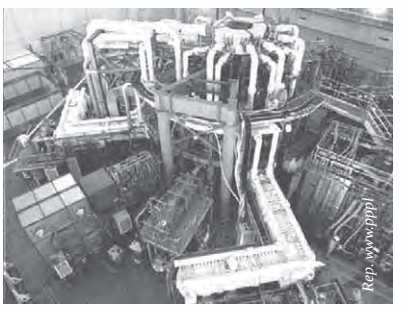
Reaksi fusi adalah reaksi penggabungan inti-inti ringan menjadi inti yang lebih berat disertai pelepasan energi. Reaksi fusi melepaskan energi sekitar 1 MeV pernukleon.

Berikut ini adalah beberapa contoh reaksi fusi.

$${}_1^1H + {}_1^2H \rightarrow {}_2^3He$$

$${}_1^1H + {}_6^{12}C \rightarrow {}_7^{13}N + \gamma$$

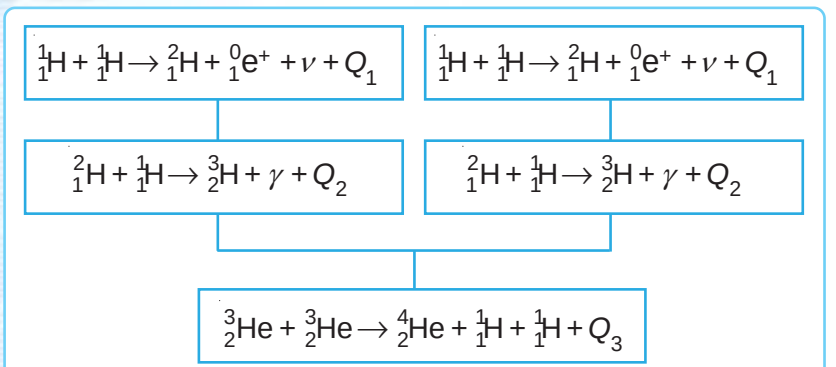
$${}_1^2H + {}_2^3He \rightarrow {}_2^4He + {}_0^1n$$



Gambar 10.13 Tokamak, sebuah reaktor fusi yang dikembangkan pada tahun 1933 di Laboratorium Fisika Universitas Princeton, New Jersey USA

Reaksi fusi dapat dilakukan dalam laboratorium dengan cara mempercepat deuteron. Reaktor fusi yang pernah dikembangkan oleh manusia antara lain JT–60 milik Jepang dan Tokamak milik Rusia.

Reaksi fusi secara alamiah terjadi di matahari. Energi dari hasil reaksi fusi menjadi sumber energi matahari dan bintang-bintang. Reaksi fusi semacam ini disebut sebagai fusi termonuklir. Diagram berikut menunjukkan mekanisme fusi pada matahari. Untuk menghasilkan reaksi fusi termonuklir tidaklah mudah. Hal ini dikarenakan reaksi termonuklir membutuhkan suhu yang sangat tinggi, yaitu sekitar 15.000.000 °C.



Keterangan:

Q_1 : 0,42 MeV

Q_2 : 5,49 MeV

Q_3 : 12,86 MeV

Gambar 10.14 Diagram mekanisme reaksi fusi pada matahari

Agar kamu lebih paham mengenai reaksi fusi, simaklah contoh soal di bawah ini!

Contoh Soal

Reaksi fusi di matahari dapat dianggap sebagai reaksi penggabungan empat buah proton menjadi inti matahari (He) dan dua buah positron. Jika diketahui ${}_1^1H$ = 1,007825 sma, ${}_2^4He$ = 4,002603 sma, ${}_1^0e^+$ = 0,000537 sma, dan 1sma = 931 MeV. Tentukanlah energi yang dihasilkan per reaksi pada fusi matahari!

Penyelesaian:

Diketahui:

${}_1^1H$ = 1,007825 sma

${}_2^4He$ = 4,002603 sma

${}_1^0e^+$ = 0,000537 sma

1 sma = 931 MeV

Ditanyakan: Q = . . .?

Jawab:

Reaksi tersebut dapat ditulis sebagai berikut.

$$4\,{}_1^1H \rightarrow {}_2^4He + 2\,{}_1^0e^+$$

Energi yang dihasilkan pada reaksi tersebut adalah:

$Q = \{4 \cdot 1{,}007825 - (4{,}002603 + 0{,}000537)\} \cdot 931\text{MeV} = 26{,}22$ MeV

Rangkuman

1. Inti atom terdiri atas proton, neutron, dan partikel-partikel elementer.
2. Massa atom terpusat pada inti atom.
3. Stabilitas inti atom bergantung pada perbandingan jumlah proton dan jumlah neutron penyusun inti atom.

$$\Delta m = \{Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n\} - m_i$$

5. Gaya inti adalah gaya khas pada inti atom yang bekerja pada jangkauan yang sangat pendek. Gaya inti mampu melawan gaya Coulomb maupun gaya atraksi.
6. Ada 3 jenis sinar radioaktif, yaitu: alfa, beta, dan gamma.
7. Mekanisme peluruhan alfa:

$${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-2} Y + {}_2^4 He$$

8. Mekanisme peluruhan beta:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{-1}e $$

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e $$

9. Peluruhan sinar gamma terjadi karena adanya kelebihan energi pada inti atom.
10. Laju peluruhan radioaktif dinyatakan sebagai aktivitas radioaktif. Besarnya laju peluruhan radioaktif dinyatakan sebagai berikut.

$$ \frac{dN}{dt} = -\lambda N $$

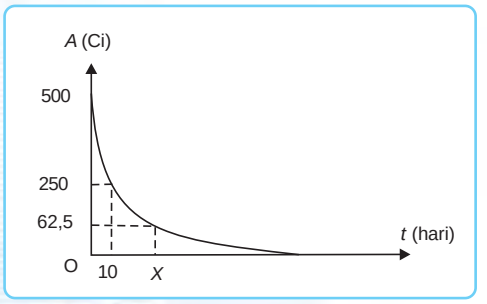
11. Waktu paruh adalah selang waktu yang diperlukan oleh suatu unsur radioaktif sehingga aktivitasnya tinggal separuh aktivitas awal.
12. Reaksi inti adalah reaksi yang terjadi akibat tumbukan inti atom dengan suatu partikel.
13. Reaksi fisi adalah reaksi pembelahan inti berat menjadi inti-inti ringan disertai dengan pelepasan energi.
14. Reaksi fusi adalah reaksi penggabungan inti-inti ringan menjadi inti yang lebih berat disertai pelepasan energi.
15. Reaktor adalah tempat berlangsungnya reaksi inti secara terkendali.

Soal-soal Uji Kompetensi

A. *Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!*

1. Dalam reaksi inti harus memenuhi . . . .
   (1) hukum kekekalan momentum
   (2) hukum kekekalan energi
   (3) hukum kekekalan nomor atom
   (4) hukum kekekalan nomor massa
   Pernyataan yang benar adalah . . . .
   a. hanya (1), (2), dan (3)
   b. hanya (1) dan (3)
   c. hanya (2) dan (4)
   d. hanya (4)
   e. (1), (2), (3), dan (4)
2. Jika massa proton dan neutron masing-masing 1,008 dan 1,009 sma maka defek massa pada inti besarnya adalah . . . .
   a. 0,012 sma
   b. 0,184 sma
   c. 0,118 sma
   d. 0,119 sma
   e. 0,120 sma
3. Stabilitas inti tergantung pada . . . .
   a. jumlah proton
   b. jumlah neutron
   c. jumlah elektron
   d. perbandingan jumlah proton dan neutron
   e. perbandingan jumlah proton dan elektron
4. Suatu partikel radioaktif diidentifikasi memiliki karakter berikut.
   1) Dibelokkan dalam medan magnet.
   2) Daya tembus rendah.
   3) Daya ionisasi rendah.
   4) Ditolak oleh benda bermuatan
   Partikel di atas kemungkinan adalah . . . .
   a. sinar alfa
   b. sinar beta
   c. positron
   d. sinar gamma
   e. neutron
5. Suatu inti ${}^{229}_{93}X$ memancarkan sinar radioaktif masing-masing 2 kali sinar alfa dan 2 kali sinar beta hingga berubah menjadi inti *Y*. Nomor atom dan nomor massa yang benar untuk *Y* adalah . . . .
   a. ${}^{229}_{91}Y$
   b. ${}^{233}_{91}Y$
   c. ${}^{229}_{89}Y$
   d. ${}^{229}_{93}Y$
   e. ${}^{233}_{93}Y$
6. Jika suatu inti radioaktif memiliki waktu paruh $3 \cdot 10^6$ tahun maka konstanta peluruhan inti tersebut adalah . . . .
   a. $2{,}31 \cdot 10^{-6}$ tahun^{-1}
   b. $2{,}31 \cdot 10^{-7}$ tahun^{-1}
   c. $2{,}31 \cdot 10^{-8}$ tahun^{-1}
   d. $2{,}31 \cdot 10^{-9}$ tahun^{-1}
   e. $2{,}31 \cdot 10^{-10}$ tahun^{-1}
7. Seorang peneliti menyimpan 100 gram sampel unsur radioaktif dengan waktu paruh 20 hari. Sisa sampel tersebut setelah 2 bulan (1 bulan = 30 hari) adalah . . . .
   a. 50 gram
   b. 25 gram
   c. 12,5 gram
   d. 6,125 gram
   e. 3,625 gram

8. Perhatikan grafik aktivitas radioaktif berikut!



Harga *X* adalah . . . .

a. 20 hari
b. 30 hari
c. 40 hari
d. 50 hari
e. 60 hari

9. Suatu unsur *X* memiliki nomor atom dan nomor massa masing-masing 87 dan 211. Berdasarkan sejarah terbentuknya unsur tersebut berasal dari . . . .

a. $^{232}_{90}Th$
b. $^{232}_{93}Np$
c. $^{238}_{92}U$
d. $^{235}_{92}U$
e. $^{236}_{92}U$

10. Persamaan reaksi inti ketika suatu inti sasaran *X* ditembak oleh sebuah partikel *a* dan menghasilkan inti *Y* serta sebuah partikel *b* dapat ditulis sebagai . . . .

a. $X + a \rightarrow Y + b$
b. $Y + b \rightarrow X + a$
c. $a + X \rightarrow Y + b$
d. $a + X \rightarrow b + Y$
e. $b + Y \rightarrow a + X$

B. ***Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!***

1. Jika diketahui:
   massa proton ($^{1}_{1}H$) = 1,007825 sma
   massa neutron ($^{1}_{0}n$) = 1,008665 sma
   1 sma = 931,4 MeV,
   tentukanlah energi ikat dan energi ikat per nukleon dari inti $^{27}_{13}Al$ dan $^{65}_{30}Zn$!
2. Jelaskan mekanisme peluruhan yang terjadi pada inti jika ia memancarkan sinar alfa sebanyak 2 kali, beta 1 kali dan positron 1 kali. Anggaplah inti transmutasinya masing-masing adalah *A*, *B*, *C*, dan *D*!
3. Suatu batuan mengandung 25% uranium-235 dan 75% timbal. Jika waktu paruh uranium $7{,}07 \cdot 10^{8}$ tahun, berapakah umur batuan tersebut?
4. Tentukan energi ikat inti dan massa inti dari $^{197}_{79}Au$ jika energi ikat per nukleonnya 7,91 Mev!
5. Berapa waktu paruh suatu zat radioaktif jika aktivitas setelah meluruh selama 75 hari adalah $\frac{1}{32}$ aktivitas awal?

BAB

10

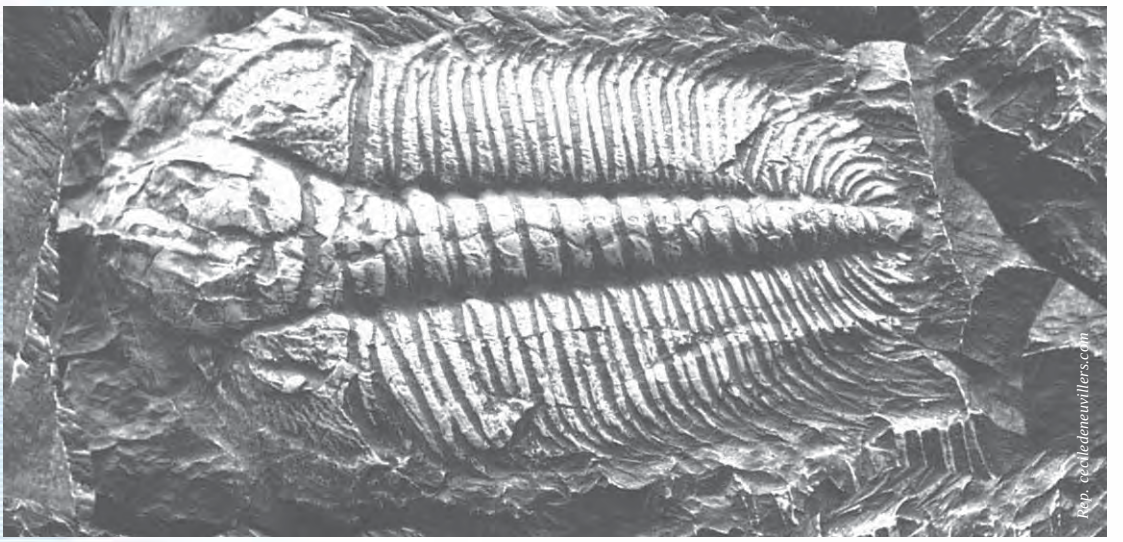
INTI ATOM DAN RADIOAKTIVITAS

BAB

10

INTI ATOM DAN RADIOAKTIVITAS

Gerbang



Gambar 10.1 Umur fosil dapat diperkirakan dengan memanfaatkan radioaktivitas

Fosil *trilobite* pada gambar di atas diketahui telah berumur 250 juta tahun. Bagaimana kita dapat mengetahui umur fosil yang telah mati jutaan tahun lamanya? Penentuan umur fosil merupakan salah satu penerapan radioaktivitas yang melibatkan atom dan inti atom. Seberapa penting pengetahuan tentang inti atom bagi kita? Pada bab ini akan kita pelajari lebih jauh tentang struktur dan karakter inti atom.

Kata Kunci: Inti Atom – Energi Ikat Inti – Gaya Inti – Radioaktivitas – Waktu Paruh – Reaksi Inti – Reaksi Fisi – Reaksi Fusi

A. Inti Atom

Inti Atom

Pada pelajaran sebelumnya kita telah mempelajari atom. Jika kita meneliti lebih jauh ke dalam atom maka pada pusat atom terdapat inti atom. Inti atom merupakan bagian penting untuk mengungkap lebih jauh tentang atom. Inti atom dianggap sebagai partikel yang memiliki massa dan bermuatan positif. Berikut ini akan kita pelajari hal-hal yang berkaitan dengan inti atom.

1. Struktur Inti Atom

Inti atom memiliki diameter sekitar 10^{-15} m atau kurang lebih $\frac{1}{100.000}$ kali ukuran atom. Inti atom atau *nukleus* tersusun atas nukleon-nukleon, yaitu proton dan neutron yang terikat sangat kuat. Banyaknya proton di dalam inti dinyatakan dengan Z (nomor atom) dan banyaknya neutron di dalam inti dinyatakan dengan N. Banyaknya proton dan neutron di dalam inti dinyatakan dengan A (nomor massa).

Secara matematis, dapat dirumuskan:

$A = Z + N$

Nomor atom dan nomor massa suatu atom biasanya disertakan dalam penulisan simbol atom. Kaidah penulisan simbol atom yang lazim digunakan adalah: ${}^{A}_{Z}X$.

Misalnya inti karbon-12 disimbolkan sebagai ${}^{12}_{6}C$, ini berarti inti tersebut terdiri atas 6 proton dan 6 neutron.

Selain menunjukkan banyaknya proton dan neutron dalam suatu atom, nomor massa juga menunjukkan massa inti atom tersebut. Massa inti atom dinyatakan dalam satuan massa atom (sma). 1 sma didefinisikan sebagai $\frac{1}{12}$ kali massa inti atom karbon yaitu $1{,}6604 \cdot 10^{-27}$ kg. Dengan menggunakan rumus $E = m \cdot c^2$, 1 sma akan setara dengan $9{,}31 \cdot 10^{8}$ eV atau 931 MeV. Penentuan massa inti atom dapat dilakukan dengan menggunakan alat yang disebut spektograf massa. Dengan alat ini terukur massa proton dan massa neutron masing-masing adalah:

massa proton (${}^{1}_{1}H$) = 1,007825 sma

massa neutron (${}^{1}_{0}n$) = 1,008665 sma

Inti atom terkonsentrasi dalam pusat atom dengan jari-jari:

$$R = R_0 (A)^{\frac{1}{3}} \qquad \ldots \quad (10.1)$$

Keterangan:

R_0 : konstanta yang besarnya 1,1 fermi (1 fermi = 1 femtometer = 10^{-15} m)

A : nomor massa

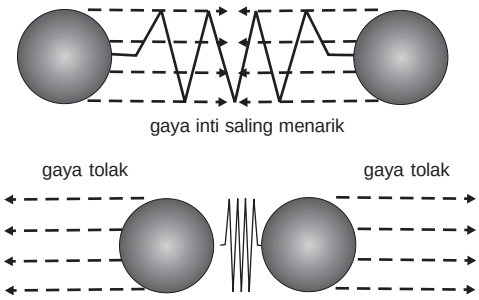
2. Gaya Inti

Di dalam inti atom terdapat banyak proton yang bermuatan positif. Jarak antarproton dalam inti atom sangat berdekatan karena ukuran inti atom sangat kecil. Menurut hukum Coulumb gaya tolak antarproton sangat besar dan gaya gravitasi antarproton tidak cukup kuat untuk melawan gaya tersebut. Oleh karena itu, diperlukan suatu gaya tersendiri yang dapat mengikat inti atom. Gaya ini bekerja pada daerah jangkauan yang sangat pendek (antara $0{,}6 \cdot 10^{-15} - 2 \cdot 10^{-15}$m). Gaya tersebut disebut gaya inti.

Gaya Inti

Salah satu teori tentang gaya inti diusulkan oleh Hideki Yukawa seorang fisikawan Jepang pada awal tahun 1930. Teori Yukawa dikenal dengan teori meson gaya nuklir. Menurut Yukawa setiap nukleon terus-menerus memancarkan dan menyerap pion. Jika terdapat nukleon lain didekatnya maka pion yang dipancarkan dapat menyeberang bolak-balik kembali ke induknya disertai pertukaran momentum yang setara dengan aksi gaya.

Gaya inti akan tolak-menolak pada jarak yang lebih pendek dari jarak tertentu, hal ini agar nukleon dalam inti tidak menyatu. Mungkin kita dapat mengilustrasikan gaya inti ini sebagai dua buah bola yang dihubungkan dengan sebuah pegas. Pada jarak yang sangat dekat, kedua bola akan saling menolak, tetapi pada jarak yang jauh kedua bola akan saling menarik.



Gambar 10.2 Ilustrasi sederhana gaya pada inti atom

3. Energi Ikat Inti

Energi Ikat Inti

Gaya inti antarpartikel inti menimbulkan energi ikat inti. Energi ikat inti (*binding energy*) adalah energi yang diperlukan untuk melepaskan partikel-partikel penyusun inti menjadi partikel-partikel yang terpisah. Energi ini dapat dihitung dengan menggunakan selisih antara jumlah massa partikel-partikel penyusun inti dengan massa inti. Selisih ini disebut sebagai defek massa, yang dirumuskan sebagai berikut.

$$\Delta m = \{Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n\} - m_i \quad \ldots \quad (10.2)$$

Keterangan:

Δm : defek massa (sma)
Z : nomor atom
m_p : massa proton (sma)
m_n : massa neutron (sma)
m_i : massa inti (sma)

Besarnya energi ikat inti jika Δm dinyatakan dalam kg adalah:

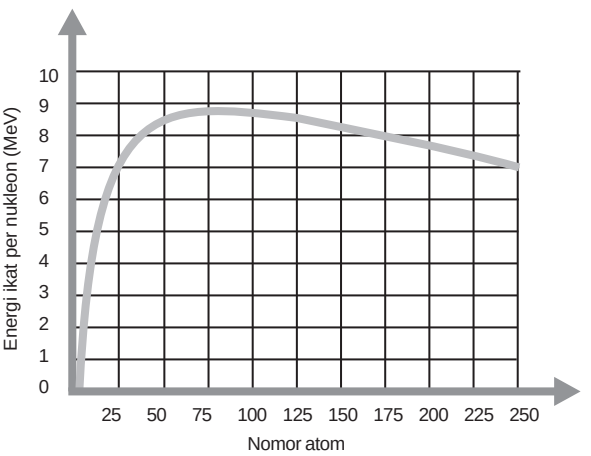
$$E_i = \Delta m \cdot c^2 \quad \ldots \quad (10.3)$$

Jika Δm dinyatakan dalam sma, besarnya energi ikat inti adalah:

$$E_i = \Delta m \cdot 931\text{MeV} \quad \ldots \quad (10.4)$$

Persamaan di atas berlaku untuk seluruh inti atom. Seperi telah kita ketahui, inti atom terdiri atas nukleon-nukleon. Masing-masing nukleon juga memiliki energi ikat. Besarnya energi ikat per nukleon dinyatakan sebagai $\frac{E_i}{A}$. Gambar 10.2 menunjukkan grafik energi ikat per nukleon pada inti atom.

Dari gambar 10.2 terlihat bahwa untuk inti-inti dengan nomor atom besar energi ikatnya semakin kecil. Untuk lebih jelasnya perhatikan contoh soal berikut!



Gambar 10.3 Grafik energi ikat per nukleon

Contoh soal

Tentukanlah energi ikat inti dan energi ikat per nukleon inti Litium ($^{7}_{3}$Li), jika massa inti Li = 7,01822 sma!

Penyelesaian:

Diketahui: m_i = 7,01822 sma

Ditanyakan: E_i = . . .?

Jawab:

Energi ikat inti $^{7}_{3}$Li

E_i = {(3 · 1,007825 + 4 · 1,008665) – 7,01822} · 931 MeV =37,105005 MeV

Energi ikat per nukleon $^{7}_{3}$Li

$$\frac{E_i}{A} = \frac{37{,}105005}{7} = 5{,}300715 \text{ MeV}$$

Dari contoh soal di atas dapat kita ketahui bahwa untuk memisahkan seluruh proton dan neutron penyusun inti Li dari atomnya diperlukan energi sekitar 37,1 MeV. Sedangkan untuk memisahkan satu proton dan satu neutron dari ikatan inti atom Li diperlukan energi sekitar 5,3 MeV. Dapat kita bayangkan betapa besarnya energi yang dibutuhkan untuk mencerai-beraikan 1 gram Li agar seluruh partikelnya terlepas dari atomnya. Untuk menguji pemahamanmu tentang pembahasan di atas kerjakan soal-soal berikut!

Kerja Mandiri 1

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

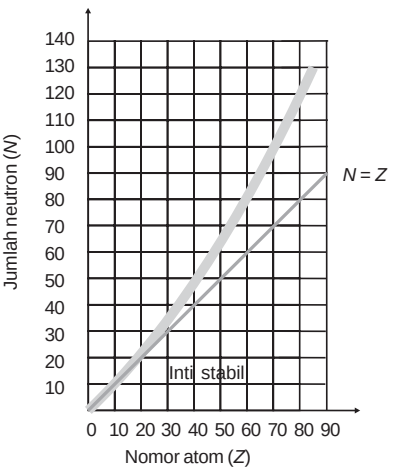
Tentukan massa inti dari unsur-unsur berikut!

1. $^{31}_{15}$P jika $\frac{E_i}{A}$ = 8,48 Mev
2. $^{81}_{35}$Br jika $\frac{E_i}{A}$ = 8,69 Mev
3. $^{120}_{50}$Sn jika $\frac{E_i}{A}$ = 8,50 Mev

4. Stabilitas Inti

Beberapa inti atom dapat bertranformasi secara spontan menjadi inti atom lain. Hal ini disebabkan oleh sifat stabilitas inti. Stabilitas suatu inti ditentukan oleh perbandingan antara jumlah neutron dengan jumlah proton. Inti-inti ringan (A < 20) akan stabil jika jumlah proton sama dengan jumlah neutron. Akan tetapi, untuk inti-inti berat proporsi neutron akan lebih besar.

Seperti telah kita ketahui bahwa gaya inti bekerja pada jangkauan yang sangat kecil, yaitu hanya bekerja antara atom-atom yang berdekatan, sedangkan jangkauan gaya Coulomb tidak terbatas. Gaya tolak antarproton akibat gaya Coulomb bekerja pada jarak yang tidak terjangkau oleh gaya inti. Hal ini mengakibatkan inti-inti berat dengan jumlah proton (Z) besar memiliki gaya tolak yang lebih besar dari gaya inti, sehingga inti-inti berat tidak stabil. Berdasarkan hasil eksperimen, inti berat yang paling stabil adalah bismut. Inti-inti berat dengan $Z > 80$ akan cenderung mejadi inti stabil dengan melepaskan proton atau menangkap neutron.



Gambar 10.4 Grafik stabilitas inti

Di alam terdapat sekitar 300 kombinasi ikatan proton dan neutron dalam keadaan stabil. Para ilmuwan sudah dapat menghasilkan sekitar 3.000 inti buatan di dalam laboratorium. Sebagian besar inti ini dalam keadaan tidak stabil, karena adanya kelebihan proton atau neutron. Inti-inti tidak stabil akan mengalami proses menuju inti stabil yang dikenal dengan proses peluruhan radioaktif atau radioaktivitas.

B. Radioaktivitas

Radioaktivitas

Radioaktivitas adalah gejala terpancarnya partikel-partikel radioaktif akibat peluruhan (disintegrasi) inti dalam rangka menuju inti stabil. Inti-inti yang mengalami peluruhan ini disebut inti radioaktif.

Gejala radioaktivitas ditemukan secara tidak sengaja oleh Henri Becquerel, seorang fisikawan berkebangsaan Prancis pada tahun 1896. Ketika ia meletakkan pelat film di sekitar uranium, pelat film tersebut kemudian menjadi hitam. Gejala fosforesensi (*phosporesence*) dan fluoresensi (*fluoresence*) tidak dapat menjawab fenomena penyebab penghitaman pelat film di sekitar uranium. Akhirnya, Becqeurel berkesimpulan bahwa penyebabnya adalah sinar yang dipancarkan secara spontan oleh uranium. Sinar ini kemudian disebut sebagai sinar radioaktif. Sedangkan unsur-unsur yang memancarkan sinar radioaktif disebut unsur radioaktif.

Dari hasil penelitian selanjutnya terdapat tiga sinar radioaktif yaitu sinar alfa (α), sinar beta (β), dan sinar gamma (γ). Selain menghitamkan pelat film, ketiga sinar tersebut memiliki sifat-sifat sebagai berikut.

1. Sinar alfa (α)

a. Sinar alfa bermuatan positif (2+).

b. Dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnet.

c. Memiliki daya tembus yang paling rendah dibandingkan sinar beta maupun gamma.

2. Sinar beta (β)

a. Sinar beta bermuatan negatif (1–).

b. Dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnet.

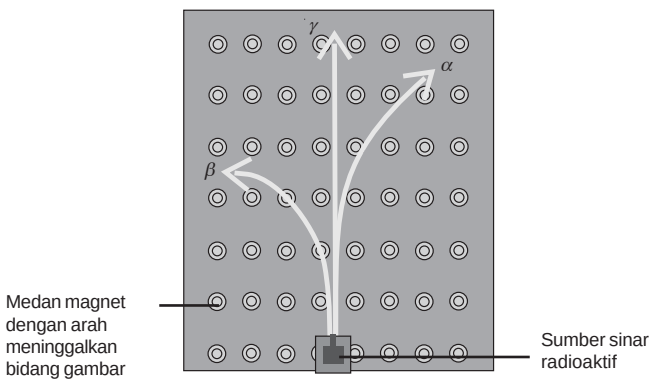
c. Memiliki daya tembus yang lebih besar dari sinar alfa, tetapi di bawah sinar gamma.

3. Sinar gamma (γ)

a. Sinar gamma tidak bermuatan sehingga tidak dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnet.

b. Sinar gamma memiliki daya tembus yang paling kuat di antara ketiga sinar radioaktif yang ada.

Perhatikan gambar 10.6 di bawah ini! Gambar 10.6 menunjukkan pembelokan sinar radioaktif di dalam medan magnetik. Perhatikan bahwa partikel alfa dan beta adalah partikel bermuatan! Ingat kembali konsep gaya Lorentz pada partikel bermuatan!



Gambar 10.6 Pembelokan sinar radioaktif dalam medan magnetik

Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa sinar alfa, beta, dan gamma termasuk sinar radioaktif. Demikian halnya dengan partikel-partikel radioaktif lain, sinar-sinar tersebut juga mengalami peluruhan. Mekanisme peluruhan sinar-sinar radioaktif dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Peluruhan alfa

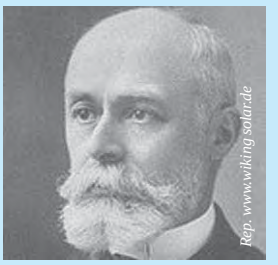
Sinar alfa sering disimbolkan dengan ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$. Dengan demikian, ketika suatu inti memancarkan sinar alfa, inti induk akan kehilangan dua proton dan dua neutron. Misalnya inti *X* dengan nomor atom *Z* dan nomor massa *A* memancarkan sinar alfa dan menghasilkan inti baru yaitu *Y*. Mekanisme peluruhannya dapat dituliskan sebagai:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-2}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}\mathrm{He} $$

Peluruhan alfa merupakan peluruhan yang memancarkan energi. Energi yang dipancarkan pada peluruhan alfa adalah:

$$ E = (m_x - m_y - m_\alpha)\, c^2 $$

Sebaiknya Tahu



Gambar 10.5 Antoine Henri Becquerel

Antoine Henri Becquerel (1852–1908)

Fisikawan Prancis ini adalah pemenang hadiah nobel di bidang fisika atas penemuannya dalam radio-aktivitas pada uranium.

Ketika ia akan melakukan penyelidikan tentang ke-mungkinan bahan fluo-resensi memancarkan sinar-X jika disinari, ia menemukan radioaktivitas pada uranium.

Berawal dari ketidak-sengajaan ini ia terus melanjutkan penelitiannya terhadap berbagai aspek radioaktivitas uranium hingga akhir hayatnya. Ia menerima hadiah Nobel di bidang fisika pada tahun 1903.

Energi yang dipancarkan pada peluruhan alfa merupakan energi kinetik inti anak (inti *Y*) dan sinar alfa. Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$E = (E_{ky} - E_{k\alpha})\, c^2$$

Energi kinetik inti anak dan sinar alfa pada peluruhan alfa lebih kecil dibandingkan energi diam inti anak dan alfa. Dengan menggunakan mekanika klasik, diperoleh energi kinetik sinar alfa:

$$E_{k\alpha} = \frac{A-4}{A} \cdot E$$

2. Peluruhan beta

Pada peluruhan beta, neutron mengalami transformasi menjadi proton dan elektron. Elektron yang meninggalkan inti atom akan terdeteksi sebagai sinar beta. Dengan demikian, nomor atom inti anak akan berselisih satu satuan dibandingkan nomor atom inti induk. Mekanisme peluruhannya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}Y + \beta + \nu$$

Keterangan:

ν : neutrino

Peluruhan beta jika dinyatakan sebagai perubahan neutron menjadi proton dapat dituliskan sebagai:

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + \nu$$

Peluruhan beta di atas merupakan peluruhan beta utama. Peluruhan beta ada dua macam, yaitu peluruhan beta utama dan peluruhan beta positif (elektron positif atau positron). Dalam peluruhan beta positif, proton berubah menjadi neutron dan memancarkan sebuah positron. Mekanisme peluruhannya adalah:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}Y + \beta + \nu$$

Perubahan proton menjadi neutron hanya dapat terjadi di inti. Mekanisme peluruhannya dapat dituliskan sebagai:

$$^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

Peluruhan beta juga menghasilkan energi. Energi yang dihasilkan pada peluruhan beta utama dapat dirumuskan:

$$E = (m_x - m_y - m_\alpha)\, c^2$$

Sedangkan energi pada peluruhan beta positif dapat dirumuskan:

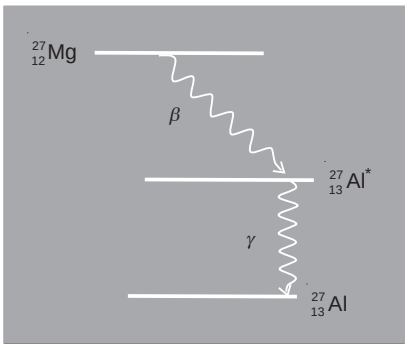
$$E = (m_x - m_y - 2m_\alpha)\, c^2$$

3. Peluruhan gamma

Pada peluruhan gamma, inti induk tidak mengalami perubahan, tetapi pada proses ini dipancarkan energi yang tinggi. Mekanisme peluruhannya adalah:

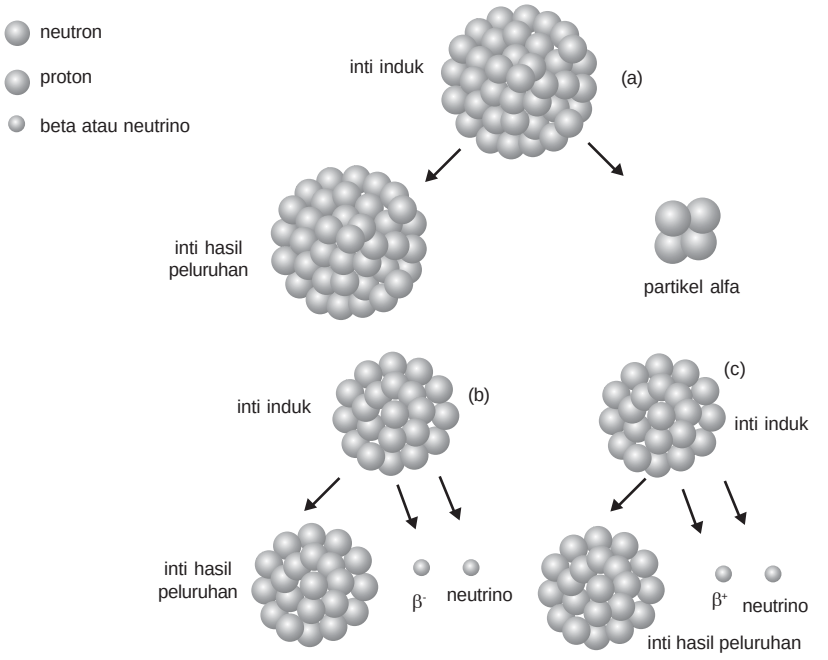
$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z}Y + {}^{0}_{0}\gamma + energi $$

Peluruhan sinar gamma terjadi jika inti berada dalam keadaan energi ikat yang lebih tinggi dari keadaan dasarnya. Inti dalam keadaan seperti ini dikatakan dalam keadaan tereksitasi dan diberi tanda bintang (*) setelah simbol intinya. Inti yang tereksitasi akan kembali ke keadaan dasarnya dengan memancarkan foton yang besarnya mencapai beberapa MeV. Gambar 10.7 menunjukkan mekanisme peluruhan ${}^{27}_{12}Mg$ menjadi ${}^{27}_{13}Al$.



Gambar 10.7 Mekanisme peluruhan sinar gamma

Ilustrasi peluruhan sinar-sinar radioaktif di atas dapat kita lihat pada gambar 10.8 berikut ini!



Gambar 10.8 (a) peluruhan sinar alfa, (b) peluruhan beta negatif, dan (c) peluruhan beta positif

Proses peluruhan radioaktif seperti pembahasan di atas akan terus berlangsung hingga dihasilkan inti yang stabil. Laju peluruhan inti radioaktif disebut sebagai aktivitas radioaktif yang besarnya dirumuskan sebagai berikut.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \qquad \ldots \ (10.5)$$

Keterangan:

$\frac{dN}{dt}$: laju peluruhan inti (peluruhan/sekon)

λ : konstanta peluruhan

Besaran λN dikenal sebagai aktivitas radioaktif dan disimbolkan dengan R. Satuan untuk R dalam SI dinyatakan dalam becquerel (Bq), 1 Bq = 1 peluruhan/sekon. Pada kenyataannya aktivitas radioaktif sangat tinggi. Sehingga digunakan satuan lain, yaitu curie (Ci) 1 Ci = $2{,}70 \cdot 10^{10}$ Bq.

Aktivitas radioaktif menyebabkan perbedaan jumlah partikel sebelum dan sesudah peluruhan. Hubungan antara jumlah partikel sebelum dan sesudah peluruhan dapat ditentukan dengan mengintegralkan persamaan 10.5. Dengan demikian, diperoleh hubungan sebagai berikut.

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad \ldots \ (10.6)$$

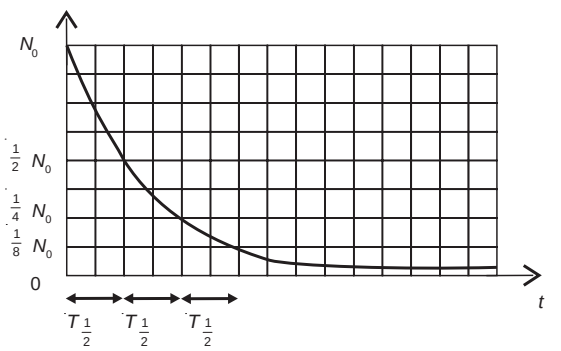
Keterangan:

N : jumlah partikel sisa yang belum meluruh

N_0 : jumlah partikel awal

t : selang waktu

Perhatikan gambar 10.9!



Gambar 10.9 Grafik hubungan N dengan T pada peluruhan radioaktif

Gambar 10.9 menunjukkan hubungan antara N dan t. Dari gambar diketahui bahwa setiap selang waktu $T_{\frac{1}{2}}$, sisa partikel yang belum meluruh tinggal separuh sebelumnya. Selang waktu yang diperlukan sehingga aktivitas radioaktif tinggal separuh aktivitas awal disebut waktu paruh dan disimbolkan sebagai $T_{\frac{1}{2}}$. Untuk menghitung waktu paruh dapat kita gunakan cara berikut.

Waktu Paruh

Kita misalkan jika $t = 0$, $N = N_0$ maka setelah $t = T_{\frac{1}{2}}$, $N = \frac{1}{2}N_0$. Dengan demikian, persamaan 10.6 akan menjadi:

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda T_{\frac{1}{2}} \ln e$$

$$\ln 2 = -\lambda T_{\frac{1}{2}}$$

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda} \quad \ldots (10.7)$$

Jika $T_{\frac{1}{2}}$ diketahui, dengan menggunakan grafik pada gambar 10.9 kita dapat menuliskan hubungan N dengan N_0 sebagai berikut.

$$N = N_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}} \quad \ldots (10.8)$$

Aktivitas radioaktif sebanding dengan banyaknya partikel. Dengan demikian, kita dapat menuliskan hubungan R dengan R_0 sebagai berikut.

$$R = R_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}} \quad \ldots (10.9)$$

Perhatikan contoh soal berikut! Selanjutnya, untuk menguji pemahamanmu tentang pembahasan di atas, kerjakanlah pelatihan di bawahnya!

Contoh Soal

10 gram sampel bahan radioaktif dengan waktu paruh 10 hari disimpan dalam suatu wadah yang terisolasi. Berapakah sisa sampel tersebut yang belum meluruh setelah 1 bulan? (anggap 1 bulan = 30 hari)

Penyelesaian:

Diketahui:

M_0 = 10 gram

$T_{\frac{1}{2}}$ = 10 hari

Ditanyakan: M = . . .?

Jawab:

Massa benda sebanding dengan jumlah partikel sehingga:

$$M = M_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}} = 10\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{30}{10}} = 10\left(\frac{1}{2}\right)^3 = 1{,}25 \text{ gram}$$

Kerja Mandiri 2

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

1. Waktu paruh suatu zat radioaktif adalah 30 hari. Tentukan persentase inti yang tersisa setelah meluruh selama 75 hari!
2. Berapa lama waktu yang diperlukan untuk meluruhkan 100 gram zat radioaktif menjadi 12,5 gram jika waktu paruh zat tersebut 15 hari?

Pada beberapa peluruhan inti radioaktif, inti tidak stabil akan meluruh beberapa kali sehingga membentuk suatu deret. Deret ini disebut deret radioaktif. Deret radioaktif ada 4 macam, yaitu:

1. Deret Thorium dengan inti induk $^{232}_{90}Th$ dan waktu paruh $1{,}39 \cdot 10^{10}$ tahun, inti stabilnya adalah $^{208}_{80}Pb$. Deret ini memiliki nomor massa (A) sama dengan $4n$.
2. Deret Neptunium dengan inti induk $^{232}_{93}Np$ dan waktu paruh $2{,}25 \cdot 10^{6}$ tahun, inti stabilnya adalah $^{209}_{83}Pb$. Deret ini memiliki nomor massa (A) sama dengan $4n + 1$.
3. Deret Uranium dengan inti induk $^{238}_{92}U$ dan waktu paruh $4{,}51 \cdot 10^{9}$ tahun, inti stabilnya adalah $^{206}_{82}Pb$. Deret ini memiliki nomor massa (A) sama dengan $4n + 2$.
4. Deret Aktinium dengan inti induk $^{235}_{92}U$ dan waktu paruh $7{,}07 \cdot 10^{8}$ tahun, inti stabilnya adalah $^{207}_{82}Pb$. Deret ini memiliki nomor massa (A) sama dengan $4n + 3$.

Penerapan Radioaktivitas

Sifat radioaktivitas suatu zat radioaktif dapat dimanfaatkan dalam berbagai bidang. Misalnya untuk mempelajari makhluk hidup, mendiagnosa dan mendeteksi penyakit, mensterilkan peralatan medis dan makanan, dan sebagai sumber energi listrik.

1. *Tracer*

Penerapan radioaktivitas banyak digunakan pada *tracer*. Dengan menggunakan *tracer,* suatu alur reaksi kimia dapat dilacak. *Tracer* biasa digunakan dalam bidang kedokteran dan untuk mempelajari hewan serta tumbuhan. Iodin–131 dapat digunakan untuk mempelajari fungsi kelenjar tiroid dan mendeteksi penyakit pada kelenjar tiroid.

2. Sterilisasi peralatan dan makanan

Penerapan radioaktivitas juga sering digunakan untuk mensterilkan peralatan medis dan makanan. Peralatan medis dan makanan disinari dengan radiasi radioaktif agar mikroorganisme yang menyebabkan kontaminasi dan penyakit dapat dimusnahkan.

3. PLTN

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) menggunakan uranium sebagai bahan bakar. Di dalam PLTN terdapat reaktor nuklir, yaitu tempat terjadinya reaksi inti. Reaksi inti dalam reaktor nuklir menghasilkan uap panas. Uap panas ini digunakan untuk menggerakkan turbin sehingga dihasilkan energi listrik.

Pemanfaatan radioakvitas dalam berbagai bidang akan kita pelajari lebih lanjut pada bab selanjutnya.

Kerja Kelompok

Kerjakan bersama kelompokmu!

Buatlah kliping tentang pemanfaatan sinar-sinar radioaktif dalam kehidupan sehari-hari! Setelah kliping selesai dibuat, diskusikan dengan teman sekelasmu! Selanjutnya, kumpulkan klipingmu untuk disimpan ke perpustakaan sebagai referensi!

C. Reaksi Inti

Reaksi Inti

Inti atom tidak hanya mengalami proses peluruhan radioaktif. Jika inti atom ditembak dengan partikel berenergi tinggi, akan terjadi suatu reaksi inti. Tumbukan antara inti atom dengan partikel penembak akan mengakibatkan terbentuknya inti baru yang berbeda dengan inti asal. Inti baru ini disebut sebagai inti transmutasi.

Reaksi inti pertama dilakukan oleh Rutherford pada tahun1919, ketika ia berhasil menembakkan partikel alfa pada inti nitrogen. Reaksi tersebut menghasilkan isotop oksigen $\left({}^{17}_{8}\mathrm{O}\right)$ dan sebuah proton. Secara matematis dapat dituliskan:

$${}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

Dalam perkembangan selanjutnya, reaksi inti dilakukan dengan menembakkan partikel yang telah dipercepat dalam sebuah akselerator. Di dalam akselerator, partikel dipercepat hingga memiliki energi kinetik yang diinginkan, kemudian ditembakkan pada inti target. Akselerator dikembangkan pertama kali oleh John D Cockcroft dan Ernest Thomas S Walton dari Inggris pada tahun 1930. Dengan akselerator ini mereka berhasil menembakkan proton pada inti lithium $\left({}^{7}_{3}\mathrm{Li}\right)$ yang menghasilkan dua inti helium.

Gambar 10.10 Akselerator yang digunakan untuk mempercepat partikel elementer

Secara matematis dapat dituliskan:

$$^{7}_{3}\text{Li} + ^{1}_{1}\text{H} \rightarrow ^{4}_{2}\text{He} + ^{4}_{2}\text{He}$$

Untuk mempersingkat penulisan, reaksi inti biasanya dituliskan dalam bentuk X (a, b) Y. Sebagai contoh, reaksi inti yang dilakukan oleh Rutherford di atas dapat dituliskan sebagai:

$$^{14}_{7}\text{N}\,(\alpha,\text{p})\,^{17}_{8}\text{O}$$

Di dalam reaksi inti ada beberapa hukum kekekalan yang perlu kita perhatikan. Hukum-hukum tersebut adalah hukum kekekalan jumlah nukleon, hukum kekekalan muatan, hukum kekekalan energi, dan hukum kekekalan momentum.

a. Hukum kekekalan jumlah nukleon

Jumlah nukleon (proton + neutron) sebelum reaksi sama dengan jumlah nukleon sesudah reaksi.

Misalkan pada reaksi

$$^{A1}_{Z1}X + ^{A2}_{Z2}a \rightarrow ^{A3}_{Z3}Y + ^{A4}_{Z4}b$$

dalam hal ini berlaku:

$$A1 + A2 = A3 + A4$$

b. Hukum kekekalan muatan

Jumlah muatan (proton) sebelum dan sesudah reaksi adalah sama. Berdasarkan hukum kekekalan muatan pada reaksi di atas berlaku:

$$Z1 + Z2 = Z3 + Z4$$

c. Hukum kekekalan energi

Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa jumlah energi total (relativistik) sebelum dan sesudah reaksi adalah sama. Energi total adalah jumlah energi kinetik (K) dan energi diamnya (E_0).

Pada reaksi di atas berlaku:

$$(K_X + E_{0X}) + (K_a + E_{0a}) = (K_Y + E_{0Y}) + (K_b + E_{0b})$$
$$(K_Y + E_b) + (K_X + E_a) = (K_{0X} + E_{0a}) + (K_{0Y} + E_{0b})$$
$$(K_Y + E_b) + (K_X + E_a) = \{(m_{0X} + m_{0a}) + (m_{0Y} + m_{0b})\}c^2$$

Keterangan:

K : energi kinetik (MeV)

m_0 : massa diam inti atau partikel (MeV)

Besarnya energi reaksi dirumuskan sebagai:

$$Q = \{(m_{0X} + m_{0a}) + (m_{0Y} + m_{0b})\}c^2 \quad \ldots \quad (10.10)$$

atau

$$Q = (K_Y + E_b) + (K_X + E_a) \quad \ldots \quad (10.11)$$

Jika $Q > 0$ reaksinya disebut reaksi eksotermik. Pada reaksi eksotermik, sistem kehilangan energi massa diamnya tetapi mendapat tambahan energi kinetik. Jika $Q < 0$ reaksinya disebut reaksi endotermik.

d. Hukum kekekalan momentum

Hukum kekekalan momentum menyatakan bahwa jumlah momentum relativistik sebelum reaksi sama dengan jumlah momentum relativistik sesudah reaksi.

$$P_x + P_a = P_y + P_b$$
$$m_x v_x + m_a v_a = m_y v_y + m_b v_b$$

dengan $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$

D. Reaksi Fisi dan Reaksi Fusi

Reaksi yang terjadi pada inti atom ada dua macam, yaitu reaksi fisi dan reaksi fusi. Berikut akan kita pelajari lebih lanjut mengenai kedua reaksi tersebut.

1. Reaksi Fisi

Reaksi Fisi

Reaksi fisi adalah reaksi pembelahan inti berat menjadi inti-inti ringan disertai dengan pelepasan energi. Inti-inti baru hasil reaksi disebut sebagai fragmen fisi. Contoh reaksi fisi yang sering digunakan adalah reaksi pembelahan uranium–235 berikut.

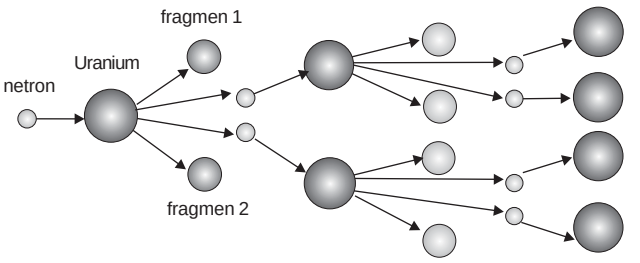
$$^{235}_{92}\text{U} + {}^{1}_{0}\text{n} \rightarrow {}^{236}_{54}\text{Xe} + {}^{94}_{38}\text{Sr} + {}^{1}_{0}\text{n} + {}^{1}_{0}\text{n}$$

Pada proses di atas, uranium–235 tereksitasi setelah menyerap neutron, kemudian uranium membelah.

Selain dengan cara di atas, reaksi fisi juga dapat terjadi dengan cara menembakkan sinar gamma atau proton pada inti target. Beberapa inti tak stabil dapat mengalami reaksi fisi secara spontan. Reaksi ini biasanya didahului dengan peluruhan sinar gamma.

Neutron yang dihasilkan akibat pembelahan pada reaksi fisi dapat menginduksi fisi, sehingga fisi dapat berjalan dengan sendirinya. Jika hal ini berlangsung tanpa kendali maka terjadi reaksi berantai dengan energi yang sangat dahsyat dan mengakibatkan kerusakan yang luar biasa, seperti pada ledakan bom atom. Karena pada reaksi fisi dilepaskan energi yang sangat besar yaitu sekitar 200 MeV untuk setiap reaksi fisi yang terjadi.

Gambar 10.11 Ledakan bom dengan hulu ledak nuklir hasil uji coba di Nevada Amerika Serikat sekitar tahun 1951 dan 1962



Gambar 10.12 Ilustrasi terjadinya reaksi fisi berantai

2. Reaksi Fusi

Reaksi Fusi

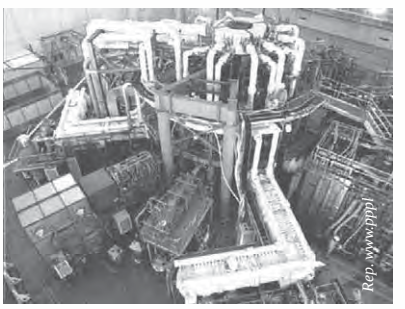
Reaksi fusi adalah reaksi penggabungan inti-inti ringan menjadi inti yang lebih berat disertai pelepasan energi. Reaksi fusi melepaskan energi sekitar 1 MeV pernukleon.

Berikut ini adalah beberapa contoh reaksi fusi.

$${}_1^1H + {}_1^2H \rightarrow {}_2^3He$$

$${}_1^1H + {}_6^{12}C \rightarrow {}_7^{13}N + \gamma$$

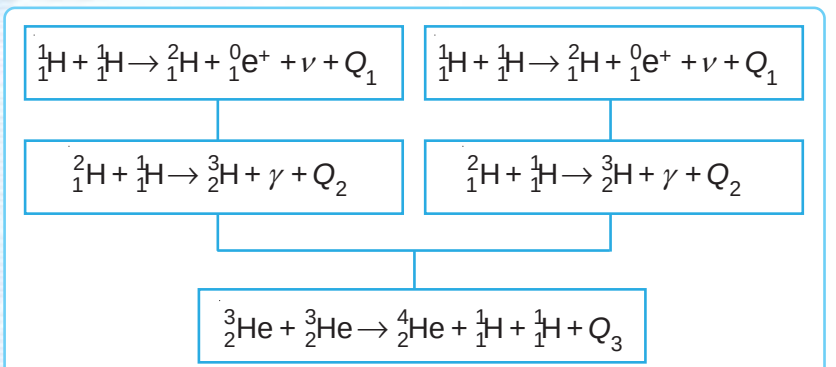
$${}_1^2H + {}_2^3He \rightarrow {}_2^4He + {}_0^1n$$



Gambar 10.13 Tokamak, sebuah reaktor fusi yang dikembangkan pada tahun 1933 di Laboratorium Fisika Universitas Princeton, New Jersey USA

Reaksi fusi dapat dilakukan dalam laboratorium dengan cara mempercepat deuteron. Reaktor fusi yang pernah dikembangkan oleh manusia antara lain JT–60 milik Jepang dan Tokamak milik Rusia.

Reaksi fusi secara alamiah terjadi di matahari. Energi dari hasil reaksi fusi menjadi sumber energi matahari dan bintang-bintang. Reaksi fusi semacam ini disebut sebagai fusi termonuklir. Diagram berikut menunjukkan mekanisme fusi pada matahari. Untuk menghasilkan reaksi fusi termonuklir tidaklah mudah. Hal ini dikarenakan reaksi termonuklir membutuhkan suhu yang sangat tinggi, yaitu sekitar 15.000.000 °C.



Keterangan:

Q_1 : 0,42 MeV

Q_2 : 5,49 MeV

Q_3 : 12,86 MeV

Gambar 10.14 Diagram mekanisme reaksi fusi pada matahari

Agar kamu lebih paham mengenai reaksi fusi, simaklah contoh soal di bawah ini!

Contoh Soal

Reaksi fusi di matahari dapat dianggap sebagai reaksi penggabungan empat buah proton menjadi inti matahari (He) dan dua buah positron. Jika diketahui ${}_1^1H$ = 1,007825 sma, ${}_2^4He$ = 4,002603 sma, ${}_1^0e^+$ = 0,000537 sma, dan 1sma = 931 MeV. Tentukanlah energi yang dihasilkan per reaksi pada fusi matahari!

Penyelesaian:

Diketahui:

${}_1^1H$ = 1,007825 sma

${}_2^4He$ = 4,002603 sma

${}_1^0e^+$ = 0,000537 sma

1 sma = 931 MeV

Ditanyakan: Q = . . .?

Jawab:

Reaksi tersebut dapat ditulis sebagai berikut.

$$4\,{}_1^1H \rightarrow {}_2^4He + 2\,{}_1^0e^+$$

Energi yang dihasilkan pada reaksi tersebut adalah:

$Q = \{4 \cdot 1{,}007825 - (4{,}002603 + 0{,}000537)\} \cdot 931\text{MeV} = 26{,}22$ MeV

Rangkuman

1. Inti atom terdiri atas proton, neutron, dan partikel-partikel elementer.
2. Massa atom terpusat pada inti atom.
3. Stabilitas inti atom bergantung pada perbandingan jumlah proton dan jumlah neutron penyusun inti atom.

$$\Delta m = \{Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n\} - m_i$$

5. Gaya inti adalah gaya khas pada inti atom yang bekerja pada jangkauan yang sangat pendek. Gaya inti mampu melawan gaya Coulomb maupun gaya atraksi.
6. Ada 3 jenis sinar radioaktif, yaitu: alfa, beta, dan gamma.
7. Mekanisme peluruhan alfa:

$${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-2} Y + {}_2^4 He$$

8. Mekanisme peluruhan beta:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{-1}e $$

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e $$

9. Peluruhan sinar gamma terjadi karena adanya kelebihan energi pada inti atom.
10. Laju peluruhan radioaktif dinyatakan sebagai aktivitas radioaktif. Besarnya laju peluruhan radioaktif dinyatakan sebagai berikut.

$$ \frac{dN}{dt} = -\lambda N $$

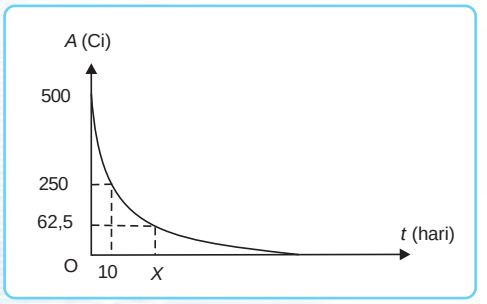
11. Waktu paruh adalah selang waktu yang diperlukan oleh suatu unsur radioaktif sehingga aktivitasnya tinggal separuh aktivitas awal.
12. Reaksi inti adalah reaksi yang terjadi akibat tumbukan inti atom dengan suatu partikel.
13. Reaksi fisi adalah reaksi pembelahan inti berat menjadi inti-inti ringan disertai dengan pelepasan energi.
14. Reaksi fusi adalah reaksi penggabungan inti-inti ringan menjadi inti yang lebih berat disertai pelepasan energi.
15. Reaktor adalah tempat berlangsungnya reaksi inti secara terkendali.

Soal-soal Uji Kompetensi

A. *Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!*

1. Dalam reaksi inti harus memenuhi . . . .
   (1) hukum kekekalan momentum
   (2) hukum kekekalan energi
   (3) hukum kekekalan nomor atom
   (4) hukum kekekalan nomor massa
   Pernyataan yang benar adalah . . . .
   a. hanya (1), (2), dan (3)
   b. hanya (1) dan (3)
   c. hanya (2) dan (4)
   d. hanya (4)
   e. (1), (2), (3), dan (4)
2. Jika massa proton dan neutron masing-masing 1,008 dan 1,009 sma maka defek massa pada inti besarnya adalah . . . .
   a. 0,012 sma
   b. 0,184 sma
   c. 0,118 sma
   d. 0,119 sma
   e. 0,120 sma
3. Stabilitas inti tergantung pada . . . .
   a. jumlah proton
   b. jumlah neutron
   c. jumlah elektron
   d. perbandingan jumlah proton dan neutron
   e. perbandingan jumlah proton dan elektron
4. Suatu partikel radioaktif diidentifikasi memiliki karakter berikut.
   1) Dibelokkan dalam medan magnet.
   2) Daya tembus rendah.
   3) Daya ionisasi rendah.
   4) Ditolak oleh benda bermuatan
   Partikel di atas kemungkinan adalah . . . .
   a. sinar alfa
   b. sinar beta
   c. positron
   d. sinar gamma
   e. neutron
5. Suatu inti ${}^{229}_{93}X$ memancarkan sinar radioaktif masing-masing 2 kali sinar alfa dan 2 kali sinar beta hingga berubah menjadi inti *Y*. Nomor atom dan nomor massa yang benar untuk *Y* adalah . . . .
   a. ${}^{229}_{91}Y$
   b. ${}^{233}_{91}Y$
   c. ${}^{229}_{89}Y$
   d. ${}^{229}_{93}Y$
   e. ${}^{233}_{93}Y$
6. Jika suatu inti radioaktif memiliki waktu paruh $3 \cdot 10^6$ tahun maka konstanta peluruhan inti tersebut adalah . . . .
   a. $2{,}31 \cdot 10^{-6}$ tahun^{-1}
   b. $2{,}31 \cdot 10^{-7}$ tahun^{-1}
   c. $2{,}31 \cdot 10^{-8}$ tahun^{-1}
   d. $2{,}31 \cdot 10^{-9}$ tahun^{-1}
   e. $2{,}31 \cdot 10^{-10}$ tahun^{-1}
7. Seorang peneliti menyimpan 100 gram sampel unsur radioaktif dengan waktu paruh 20 hari. Sisa sampel tersebut setelah 2 bulan (1 bulan = 30 hari) adalah . . . .
   a. 50 gram
   b. 25 gram
   c. 12,5 gram
   d. 6,125 gram
   e. 3,625 gram

8. Perhatikan grafik aktivitas radioaktif berikut!



Harga *X* adalah . . . .

a. 20 hari
b. 30 hari
c. 40 hari
d. 50 hari
e. 60 hari

9. Suatu unsur *X* memiliki nomor atom dan nomor massa masing-masing 87 dan 211. Berdasarkan sejarah terbentuknya unsur tersebut berasal dari . . . .

a. $^{232}_{90}Th$
b. $^{232}_{93}Np$
c. $^{238}_{92}U$
d. $^{235}_{92}U$
e. $^{236}_{92}U$

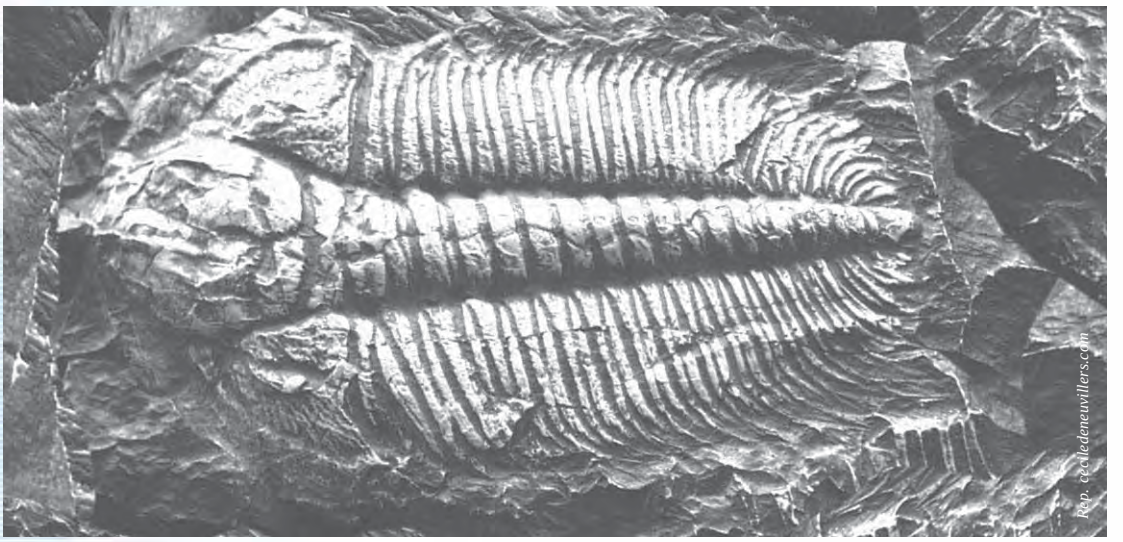
10. Persamaan reaksi inti ketika suatu inti sasaran *X* ditembak oleh sebuah partikel *a* dan menghasilkan inti *Y* serta sebuah partikel *b* dapat ditulis sebagai . . . .

a. $X + a \rightarrow Y + b$
b. $Y + b \rightarrow X + a$
c. $a + X \rightarrow Y + b$
d. $a + X \rightarrow b + Y$
e. $b + Y \rightarrow a + X$

B. ***Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!***

1. Jika diketahui:
   massa proton ($^{1}_{1}H$) = 1,007825 sma
   massa neutron ($^{1}_{0}n$) = 1,008665 sma
   1 sma = 931,4 MeV,
   tentukanlah energi ikat dan energi ikat per nukleon dari inti $^{27}_{13}Al$ dan $^{65}_{30}Zn$!
2. Jelaskan mekanisme peluruhan yang terjadi pada inti jika ia memancarkan sinar alfa sebanyak 2 kali, beta 1 kali dan positron 1 kali. Anggaplah inti transmutasinya masing-masing adalah *A*, *B*, *C*, dan *D*!
3. Suatu batuan mengandung 25% uranium-235 dan 75% timbal. Jika waktu paruh uranium $7{,}07 \cdot 10^{8}$ tahun, berapakah umur batuan tersebut?
4. Tentukan energi ikat inti dan massa inti dari $^{197}_{79}Au$ jika energi ikat per nukleonnya 7,91 Mev!
5. Berapa waktu paruh suatu zat radioaktif jika aktivitas setelah meluruh selama 75 hari adalah $\frac{1}{32}$ aktivitas awal?

Gerbang



Gambar 10.1 Umur fosil dapat diperkirakan dengan memanfaatkan radioaktivitas

Fosil *trilobite* pada gambar di atas diketahui telah berumur 250 juta tahun. Bagaimana kita dapat mengetahui umur fosil yang telah mati jutaan tahun lamanya? Penentuan umur fosil merupakan salah satu penerapan radioaktivitas yang melibatkan atom dan inti atom. Seberapa penting pengetahuan tentang inti atom bagi kita? Pada bab ini akan kita pelajari lebih jauh tentang struktur dan karakter inti atom.

Kata Kunci: Inti Atom – Energi Ikat Inti – Gaya Inti – Radioaktivitas – Waktu Paruh – Reaksi Inti – Reaksi Fisi – Reaksi Fusi

A. Inti Atom

Inti Atom

Pada pelajaran sebelumnya kita telah mempelajari atom. Jika kita meneliti lebih jauh ke dalam atom maka pada pusat atom terdapat inti atom. Inti atom merupakan bagian penting untuk mengungkap lebih jauh tentang atom. Inti atom dianggap sebagai partikel yang memiliki massa dan bermuatan positif. Berikut ini akan kita pelajari hal-hal yang berkaitan dengan inti atom.

1. Struktur Inti Atom

Inti atom memiliki diameter sekitar 10^{-15} m atau kurang lebih $\frac{1}{100.000}$ kali ukuran atom. Inti atom atau *nukleus* tersusun atas nukleon-nukleon, yaitu proton dan neutron yang terikat sangat kuat. Banyaknya proton di dalam inti dinyatakan dengan Z (nomor atom) dan banyaknya neutron di dalam inti dinyatakan dengan N. Banyaknya proton dan neutron di dalam inti dinyatakan dengan A (nomor massa).

Secara matematis, dapat dirumuskan:

$A = Z + N$

Nomor atom dan nomor massa suatu atom biasanya disertakan dalam penulisan simbol atom. Kaidah penulisan simbol atom yang lazim digunakan adalah: ${}^{A}_{Z}X$.

Misalnya inti karbon-12 disimbolkan sebagai ${}^{12}_{6}C$, ini berarti inti tersebut terdiri atas 6 proton dan 6 neutron.

Selain menunjukkan banyaknya proton dan neutron dalam suatu atom, nomor massa juga menunjukkan massa inti atom tersebut. Massa inti atom dinyatakan dalam satuan massa atom (sma). 1 sma didefinisikan sebagai $\frac{1}{12}$ kali massa inti atom karbon yaitu $1{,}6604 \cdot 10^{-27}$ kg. Dengan menggunakan rumus $E = m \cdot c^2$, 1 sma akan setara dengan $9{,}31 \cdot 10^{8}$ eV atau 931 MeV. Penentuan massa inti atom dapat dilakukan dengan menggunakan alat yang disebut spektograf massa. Dengan alat ini terukur massa proton dan massa neutron masing-masing adalah:

massa proton (${}^{1}_{1}H$) = 1,007825 sma

massa neutron (${}^{1}_{0}n$) = 1,008665 sma

Inti atom terkonsentrasi dalam pusat atom dengan jari-jari:

$$R = R_0 (A)^{\frac{1}{3}} \qquad \ldots \quad (10.1)$$

Keterangan:

R_0 : konstanta yang besarnya 1,1 fermi (1 fermi = 1 femtometer = 10^{-15} m)

A : nomor massa

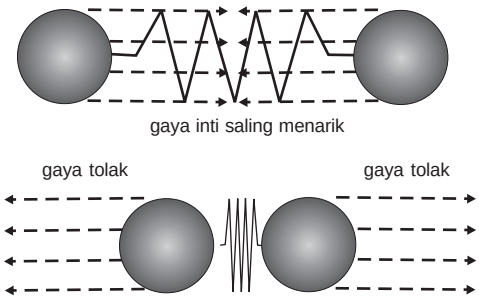
2. Gaya Inti

Di dalam inti atom terdapat banyak proton yang bermuatan positif. Jarak antarproton dalam inti atom sangat berdekatan karena ukuran inti atom sangat kecil. Menurut hukum Coulumb gaya tolak antarproton sangat besar dan gaya gravitasi antarproton tidak cukup kuat untuk melawan gaya tersebut. Oleh karena itu, diperlukan suatu gaya tersendiri yang dapat mengikat inti atom. Gaya ini bekerja pada daerah jangkauan yang sangat pendek (antara $0{,}6 \cdot 10^{-15} - 2 \cdot 10^{-15}$m). Gaya tersebut disebut gaya inti.

Gaya Inti

Salah satu teori tentang gaya inti diusulkan oleh Hideki Yukawa seorang fisikawan Jepang pada awal tahun 1930. Teori Yukawa dikenal dengan teori meson gaya nuklir. Menurut Yukawa setiap nukleon terus-menerus memancarkan dan menyerap pion. Jika terdapat nukleon lain didekatnya maka pion yang dipancarkan dapat menyeberang bolak-balik kembali ke induknya disertai pertukaran momentum yang setara dengan aksi gaya.

Gaya inti akan tolak-menolak pada jarak yang lebih pendek dari jarak tertentu, hal ini agar nukleon dalam inti tidak menyatu. Mungkin kita dapat mengilustrasikan gaya inti ini sebagai dua buah bola yang dihubungkan dengan sebuah pegas. Pada jarak yang sangat dekat, kedua bola akan saling menolak, tetapi pada jarak yang jauh kedua bola akan saling menarik.



Gambar 10.2 Ilustrasi sederhana gaya pada inti atom

3. Energi Ikat Inti

Energi Ikat Inti

Gaya inti antarpartikel inti menimbulkan energi ikat inti. Energi ikat inti (*binding energy*) adalah energi yang diperlukan untuk melepaskan partikel-partikel penyusun inti menjadi partikel-partikel yang terpisah. Energi ini dapat dihitung dengan menggunakan selisih antara jumlah massa partikel-partikel penyusun inti dengan massa inti. Selisih ini disebut sebagai defek massa, yang dirumuskan sebagai berikut.

$$\Delta m = \{Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n\} - m_i \quad \ldots \quad (10.2)$$

Keterangan:

Δm : defek massa (sma)
Z : nomor atom
m_p : massa proton (sma)
m_n : massa neutron (sma)
m_i : massa inti (sma)

Besarnya energi ikat inti jika Δm dinyatakan dalam kg adalah:

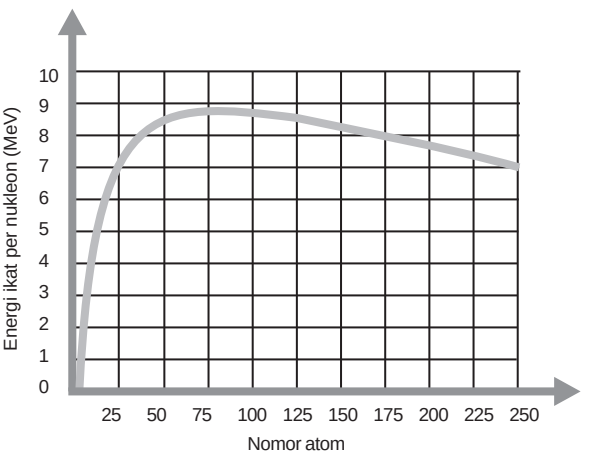
$$E_i = \Delta m \cdot c^2 \quad \ldots \quad (10.3)$$

Jika Δm dinyatakan dalam sma, besarnya energi ikat inti adalah:

$$E_i = \Delta m \cdot 931\text{MeV} \quad \ldots \quad (10.4)$$

Persamaan di atas berlaku untuk seluruh inti atom. Seperi telah kita ketahui, inti atom terdiri atas nukleon-nukleon. Masing-masing nukleon juga memiliki energi ikat. Besarnya energi ikat per nukleon dinyatakan sebagai $\frac{E_i}{A}$. Gambar 10.2 menunjukkan grafik energi ikat per nukleon pada inti atom.

Dari gambar 10.2 terlihat bahwa untuk inti-inti dengan nomor atom besar energi ikatnya semakin kecil. Untuk lebih jelasnya perhatikan contoh soal berikut!



Gambar 10.3 Grafik energi ikat per nukleon

Contoh soal

Tentukanlah energi ikat inti dan energi ikat per nukleon inti Litium ($^{7}_{3}$Li), jika massa inti Li = 7,01822 sma!

Penyelesaian:

Diketahui: m_i = 7,01822 sma

Ditanyakan: E_i = . . .?

Jawab:

Energi ikat inti $^{7}_{3}$Li

E_i = {(3 · 1,007825 + 4 · 1,008665) – 7,01822} · 931 MeV =37,105005 MeV

Energi ikat per nukleon $^{7}_{3}$Li

$$\frac{E_i}{A} = \frac{37{,}105005}{7} = 5{,}300715 \text{ MeV}$$

Dari contoh soal di atas dapat kita ketahui bahwa untuk memisahkan seluruh proton dan neutron penyusun inti Li dari atomnya diperlukan energi sekitar 37,1 MeV. Sedangkan untuk memisahkan satu proton dan satu neutron dari ikatan inti atom Li diperlukan energi sekitar 5,3 MeV. Dapat kita bayangkan betapa besarnya energi yang dibutuhkan untuk mencerai-beraikan 1 gram Li agar seluruh partikelnya terlepas dari atomnya. Untuk menguji pemahamanmu tentang pembahasan di atas kerjakan soal-soal berikut!

Kerja Mandiri 1

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

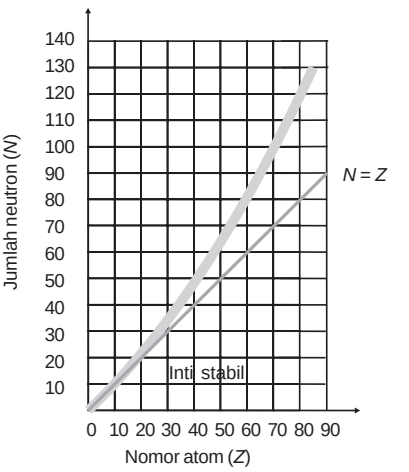
Tentukan massa inti dari unsur-unsur berikut!

1. $^{31}_{15}$P jika $\frac{E_i}{A}$ = 8,48 Mev
2. $^{81}_{35}$Br jika $\frac{E_i}{A}$ = 8,69 Mev
3. $^{120}_{50}$Sn jika $\frac{E_i}{A}$ = 8,50 Mev

4. Stabilitas Inti

Beberapa inti atom dapat bertranformasi secara spontan menjadi inti atom lain. Hal ini disebabkan oleh sifat stabilitas inti. Stabilitas suatu inti ditentukan oleh perbandingan antara jumlah neutron dengan jumlah proton. Inti-inti ringan (A < 20) akan stabil jika jumlah proton sama dengan jumlah neutron. Akan tetapi, untuk inti-inti berat proporsi neutron akan lebih besar.

Seperti telah kita ketahui bahwa gaya inti bekerja pada jangkauan yang sangat kecil, yaitu hanya bekerja antara atom-atom yang berdekatan, sedangkan jangkauan gaya Coulomb tidak terbatas. Gaya tolak antarproton akibat gaya Coulomb bekerja pada jarak yang tidak terjangkau oleh gaya inti. Hal ini mengakibatkan inti-inti berat dengan jumlah proton (Z) besar memiliki gaya tolak yang lebih besar dari gaya inti, sehingga inti-inti berat tidak stabil. Berdasarkan hasil eksperimen, inti berat yang paling stabil adalah bismut. Inti-inti berat dengan $Z > 80$ akan cenderung mejadi inti stabil dengan melepaskan proton atau menangkap neutron.



Gambar 10.4 Grafik stabilitas inti

Di alam terdapat sekitar 300 kombinasi ikatan proton dan neutron dalam keadaan stabil. Para ilmuwan sudah dapat menghasilkan sekitar 3.000 inti buatan di dalam laboratorium. Sebagian besar inti ini dalam keadaan tidak stabil, karena adanya kelebihan proton atau neutron. Inti-inti tidak stabil akan mengalami proses menuju inti stabil yang dikenal dengan proses peluruhan radioaktif atau radioaktivitas.

B. Radioaktivitas

Radioaktivitas

Radioaktivitas adalah gejala terpancarnya partikel-partikel radioaktif akibat peluruhan (disintegrasi) inti dalam rangka menuju inti stabil. Inti-inti yang mengalami peluruhan ini disebut inti radioaktif.

Gejala radioaktivitas ditemukan secara tidak sengaja oleh Henri Becquerel, seorang fisikawan berkebangsaan Prancis pada tahun 1896. Ketika ia meletakkan pelat film di sekitar uranium, pelat film tersebut kemudian menjadi hitam. Gejala fosforesensi (*phosporesence*) dan fluoresensi (*fluoresence*) tidak dapat menjawab fenomena penyebab penghitaman pelat film di sekitar uranium. Akhirnya, Becqeurel berkesimpulan bahwa penyebabnya adalah sinar yang dipancarkan secara spontan oleh uranium. Sinar ini kemudian disebut sebagai sinar radioaktif. Sedangkan unsur-unsur yang memancarkan sinar radioaktif disebut unsur radioaktif.

Dari hasil penelitian selanjutnya terdapat tiga sinar radioaktif yaitu sinar alfa (α), sinar beta (β), dan sinar gamma (γ). Selain menghitamkan pelat film, ketiga sinar tersebut memiliki sifat-sifat sebagai berikut.

1. Sinar alfa (α)

a. Sinar alfa bermuatan positif (2+).

b. Dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnet.

c. Memiliki daya tembus yang paling rendah dibandingkan sinar beta maupun gamma.

2. Sinar beta (β)

a. Sinar beta bermuatan negatif (1–).

b. Dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnet.

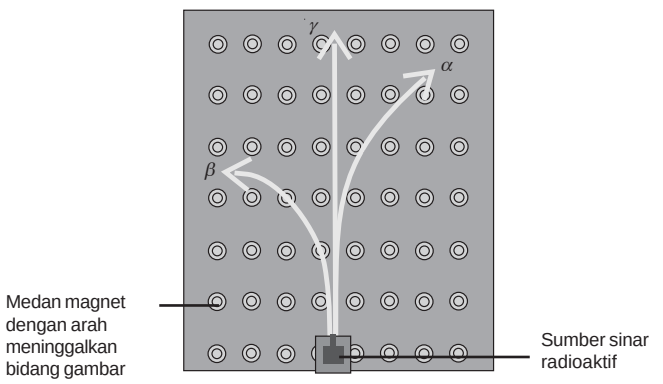
c. Memiliki daya tembus yang lebih besar dari sinar alfa, tetapi di bawah sinar gamma.

3. Sinar gamma (γ)

a. Sinar gamma tidak bermuatan sehingga tidak dibelokkan oleh medan listrik maupun medan magnet.

b. Sinar gamma memiliki daya tembus yang paling kuat di antara ketiga sinar radioaktif yang ada.

Perhatikan gambar 10.6 di bawah ini! Gambar 10.6 menunjukkan pembelokan sinar radioaktif di dalam medan magnetik. Perhatikan bahwa partikel alfa dan beta adalah partikel bermuatan! Ingat kembali konsep gaya Lorentz pada partikel bermuatan!



Gambar 10.6 Pembelokan sinar radioaktif dalam medan magnetik

Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa sinar alfa, beta, dan gamma termasuk sinar radioaktif. Demikian halnya dengan partikel-partikel radioaktif lain, sinar-sinar tersebut juga mengalami peluruhan. Mekanisme peluruhan sinar-sinar radioaktif dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Peluruhan alfa

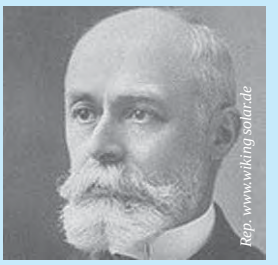
Sinar alfa sering disimbolkan dengan ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$. Dengan demikian, ketika suatu inti memancarkan sinar alfa, inti induk akan kehilangan dua proton dan dua neutron. Misalnya inti *X* dengan nomor atom *Z* dan nomor massa *A* memancarkan sinar alfa dan menghasilkan inti baru yaitu *Y*. Mekanisme peluruhannya dapat dituliskan sebagai:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-2}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}\mathrm{He} $$

Peluruhan alfa merupakan peluruhan yang memancarkan energi. Energi yang dipancarkan pada peluruhan alfa adalah:

$$ E = (m_x - m_y - m_\alpha)\, c^2 $$

Sebaiknya Tahu



Gambar 10.5 Antoine Henri Becquerel

Antoine Henri Becquerel (1852–1908)

Fisikawan Prancis ini adalah pemenang hadiah nobel di bidang fisika atas penemuannya dalam radio-aktivitas pada uranium.

Ketika ia akan melakukan penyelidikan tentang ke-mungkinan bahan fluo-resensi memancarkan sinar-X jika disinari, ia menemukan radioaktivitas pada uranium.

Berawal dari ketidak-sengajaan ini ia terus melanjutkan penelitiannya terhadap berbagai aspek radioaktivitas uranium hingga akhir hayatnya. Ia menerima hadiah Nobel di bidang fisika pada tahun 1903.

Energi yang dipancarkan pada peluruhan alfa merupakan energi kinetik inti anak (inti *Y*) dan sinar alfa. Secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$E = (E_{ky} - E_{k\alpha})\, c^2$$

Energi kinetik inti anak dan sinar alfa pada peluruhan alfa lebih kecil dibandingkan energi diam inti anak dan alfa. Dengan menggunakan mekanika klasik, diperoleh energi kinetik sinar alfa:

$$E_{k\alpha} = \frac{A-4}{A} \cdot E$$

2. Peluruhan beta

Pada peluruhan beta, neutron mengalami transformasi menjadi proton dan elektron. Elektron yang meninggalkan inti atom akan terdeteksi sebagai sinar beta. Dengan demikian, nomor atom inti anak akan berselisih satu satuan dibandingkan nomor atom inti induk. Mekanisme peluruhannya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}Y + \beta + \nu$$

Keterangan:

ν : neutrino

Peluruhan beta jika dinyatakan sebagai perubahan neutron menjadi proton dapat dituliskan sebagai:

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e + \nu$$

Peluruhan beta di atas merupakan peluruhan beta utama. Peluruhan beta ada dua macam, yaitu peluruhan beta utama dan peluruhan beta positif (elektron positif atau positron). Dalam peluruhan beta positif, proton berubah menjadi neutron dan memancarkan sebuah positron. Mekanisme peluruhannya adalah:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z-1}{}^{A}Y + \beta + \nu$$

Perubahan proton menjadi neutron hanya dapat terjadi di inti. Mekanisme peluruhannya dapat dituliskan sebagai:

$$^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e + \nu$$

Peluruhan beta juga menghasilkan energi. Energi yang dihasilkan pada peluruhan beta utama dapat dirumuskan:

$$E = (m_x - m_y - m_\alpha)\, c^2$$

Sedangkan energi pada peluruhan beta positif dapat dirumuskan:

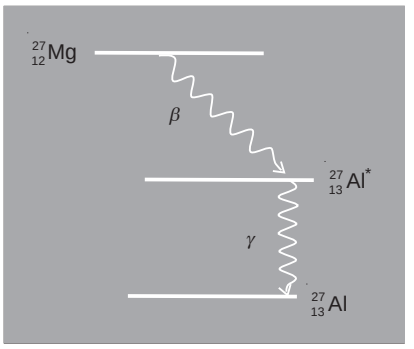
$$E = (m_x - m_y - 2m_\alpha)\, c^2$$

3. Peluruhan gamma

Pada peluruhan gamma, inti induk tidak mengalami perubahan, tetapi pada proses ini dipancarkan energi yang tinggi. Mekanisme peluruhannya adalah:

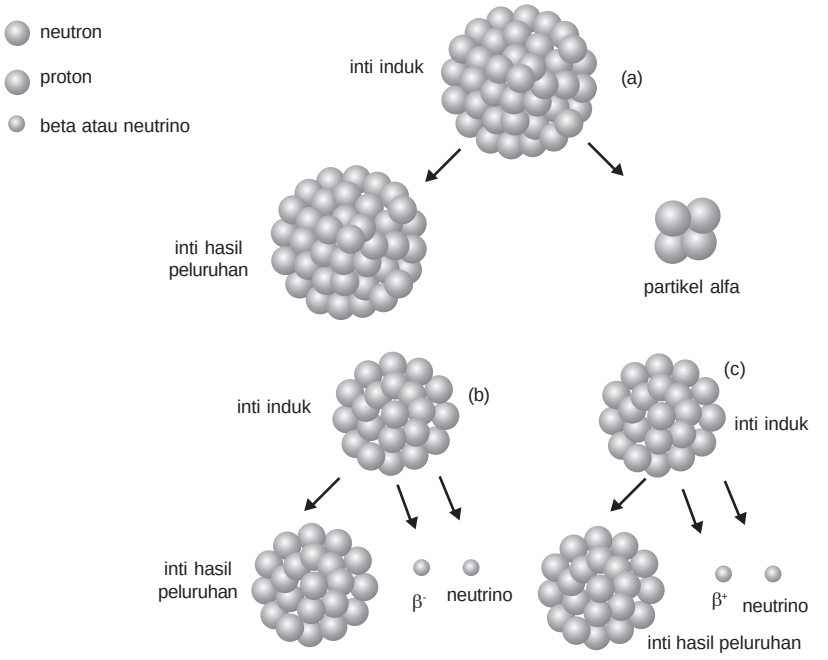
$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z}Y + {}^{0}_{0}\gamma + energi $$

Peluruhan sinar gamma terjadi jika inti berada dalam keadaan energi ikat yang lebih tinggi dari keadaan dasarnya. Inti dalam keadaan seperti ini dikatakan dalam keadaan tereksitasi dan diberi tanda bintang (*) setelah simbol intinya. Inti yang tereksitasi akan kembali ke keadaan dasarnya dengan memancarkan foton yang besarnya mencapai beberapa MeV. Gambar 10.7 menunjukkan mekanisme peluruhan ${}^{27}_{12}Mg$ menjadi ${}^{27}_{13}Al$.



Gambar 10.7 Mekanisme peluruhan sinar gamma

Ilustrasi peluruhan sinar-sinar radioaktif di atas dapat kita lihat pada gambar 10.8 berikut ini!



Gambar 10.8 (a) peluruhan sinar alfa, (b) peluruhan beta negatif, dan (c) peluruhan beta positif

Proses peluruhan radioaktif seperti pembahasan di atas akan terus berlangsung hingga dihasilkan inti yang stabil. Laju peluruhan inti radioaktif disebut sebagai aktivitas radioaktif yang besarnya dirumuskan sebagai berikut.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \qquad \ldots \ (10.5)$$

Keterangan:

$\frac{dN}{dt}$: laju peluruhan inti (peluruhan/sekon)

λ : konstanta peluruhan

Besaran λN dikenal sebagai aktivitas radioaktif dan disimbolkan dengan R. Satuan untuk R dalam SI dinyatakan dalam becquerel (Bq), 1 Bq = 1 peluruhan/sekon. Pada kenyataannya aktivitas radioaktif sangat tinggi. Sehingga digunakan satuan lain, yaitu curie (Ci) 1 Ci = $2{,}70 \cdot 10^{10}$ Bq.

Aktivitas radioaktif menyebabkan perbedaan jumlah partikel sebelum dan sesudah peluruhan. Hubungan antara jumlah partikel sebelum dan sesudah peluruhan dapat ditentukan dengan mengintegralkan persamaan 10.5. Dengan demikian, diperoleh hubungan sebagai berikut.

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad \ldots \ (10.6)$$

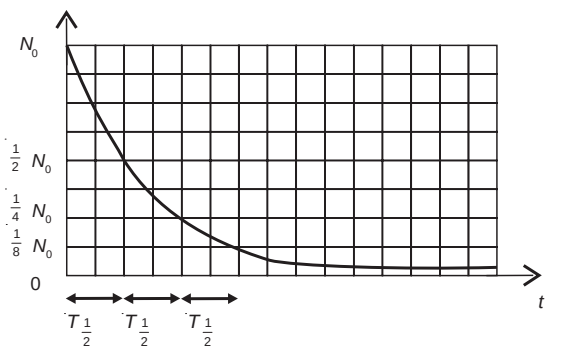
Keterangan:

N : jumlah partikel sisa yang belum meluruh

N_0 : jumlah partikel awal

t : selang waktu

Perhatikan gambar 10.9!



Gambar 10.9 Grafik hubungan N dengan T pada peluruhan radioaktif

Gambar 10.9 menunjukkan hubungan antara N dan t. Dari gambar diketahui bahwa setiap selang waktu $T_{\frac{1}{2}}$, sisa partikel yang belum meluruh tinggal separuh sebelumnya. Selang waktu yang diperlukan sehingga aktivitas radioaktif tinggal separuh aktivitas awal disebut waktu paruh dan disimbolkan sebagai $T_{\frac{1}{2}}$. Untuk menghitung waktu paruh dapat kita gunakan cara berikut.

Waktu Paruh

Kita misalkan jika $t = 0$, $N = N_0$ maka setelah $t = T_{\frac{1}{2}}$, $N = \frac{1}{2}N_0$. Dengan demikian, persamaan 10.6 akan menjadi:

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda T_{\frac{1}{2}} \ln e$$

$$\ln 2 = -\lambda T_{\frac{1}{2}}$$

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0{,}693}{\lambda} \quad \ldots (10.7)$$

Jika $T_{\frac{1}{2}}$ diketahui, dengan menggunakan grafik pada gambar 10.9 kita dapat menuliskan hubungan N dengan N_0 sebagai berikut.

$$N = N_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}} \quad \ldots (10.8)$$

Aktivitas radioaktif sebanding dengan banyaknya partikel. Dengan demikian, kita dapat menuliskan hubungan R dengan R_0 sebagai berikut.

$$R = R_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}} \quad \ldots (10.9)$$

Perhatikan contoh soal berikut! Selanjutnya, untuk menguji pemahamanmu tentang pembahasan di atas, kerjakanlah pelatihan di bawahnya!

Contoh Soal

10 gram sampel bahan radioaktif dengan waktu paruh 10 hari disimpan dalam suatu wadah yang terisolasi. Berapakah sisa sampel tersebut yang belum meluruh setelah 1 bulan? (anggap 1 bulan = 30 hari)

Penyelesaian:

Diketahui:

M_0 = 10 gram

$T_{\frac{1}{2}}$ = 10 hari

Ditanyakan: M = . . .?

Jawab:

Massa benda sebanding dengan jumlah partikel sehingga:

$$M = M_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}} = 10\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{30}{10}} = 10\left(\frac{1}{2}\right)^3 = 1{,}25 \text{ gram}$$

Kerja Mandiri 2

Kerjakan soal berikut dengan tepat!

1. Waktu paruh suatu zat radioaktif adalah 30 hari. Tentukan persentase inti yang tersisa setelah meluruh selama 75 hari!
2. Berapa lama waktu yang diperlukan untuk meluruhkan 100 gram zat radioaktif menjadi 12,5 gram jika waktu paruh zat tersebut 15 hari?

Pada beberapa peluruhan inti radioaktif, inti tidak stabil akan meluruh beberapa kali sehingga membentuk suatu deret. Deret ini disebut deret radioaktif. Deret radioaktif ada 4 macam, yaitu:

1. Deret Thorium dengan inti induk $^{232}_{90}Th$ dan waktu paruh $1{,}39 \cdot 10^{10}$ tahun, inti stabilnya adalah $^{208}_{80}Pb$. Deret ini memiliki nomor massa (A) sama dengan $4n$.
2. Deret Neptunium dengan inti induk $^{232}_{93}Np$ dan waktu paruh $2{,}25 \cdot 10^{6}$ tahun, inti stabilnya adalah $^{209}_{83}Pb$. Deret ini memiliki nomor massa (A) sama dengan $4n + 1$.
3. Deret Uranium dengan inti induk $^{238}_{92}U$ dan waktu paruh $4{,}51 \cdot 10^{9}$ tahun, inti stabilnya adalah $^{206}_{82}Pb$. Deret ini memiliki nomor massa (A) sama dengan $4n + 2$.
4. Deret Aktinium dengan inti induk $^{235}_{92}U$ dan waktu paruh $7{,}07 \cdot 10^{8}$ tahun, inti stabilnya adalah $^{207}_{82}Pb$. Deret ini memiliki nomor massa (A) sama dengan $4n + 3$.

Penerapan Radioaktivitas

Sifat radioaktivitas suatu zat radioaktif dapat dimanfaatkan dalam berbagai bidang. Misalnya untuk mempelajari makhluk hidup, mendiagnosa dan mendeteksi penyakit, mensterilkan peralatan medis dan makanan, dan sebagai sumber energi listrik.

1. *Tracer*

Penerapan radioaktivitas banyak digunakan pada *tracer*. Dengan menggunakan *tracer,* suatu alur reaksi kimia dapat dilacak. *Tracer* biasa digunakan dalam bidang kedokteran dan untuk mempelajari hewan serta tumbuhan. Iodin–131 dapat digunakan untuk mempelajari fungsi kelenjar tiroid dan mendeteksi penyakit pada kelenjar tiroid.

2. Sterilisasi peralatan dan makanan

Penerapan radioaktivitas juga sering digunakan untuk mensterilkan peralatan medis dan makanan. Peralatan medis dan makanan disinari dengan radiasi radioaktif agar mikroorganisme yang menyebabkan kontaminasi dan penyakit dapat dimusnahkan.

3. PLTN

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) menggunakan uranium sebagai bahan bakar. Di dalam PLTN terdapat reaktor nuklir, yaitu tempat terjadinya reaksi inti. Reaksi inti dalam reaktor nuklir menghasilkan uap panas. Uap panas ini digunakan untuk menggerakkan turbin sehingga dihasilkan energi listrik.

Pemanfaatan radioakvitas dalam berbagai bidang akan kita pelajari lebih lanjut pada bab selanjutnya.

Kerja Kelompok

Kerjakan bersama kelompokmu!

Buatlah kliping tentang pemanfaatan sinar-sinar radioaktif dalam kehidupan sehari-hari! Setelah kliping selesai dibuat, diskusikan dengan teman sekelasmu! Selanjutnya, kumpulkan klipingmu untuk disimpan ke perpustakaan sebagai referensi!

C. Reaksi Inti

Reaksi Inti

Inti atom tidak hanya mengalami proses peluruhan radioaktif. Jika inti atom ditembak dengan partikel berenergi tinggi, akan terjadi suatu reaksi inti. Tumbukan antara inti atom dengan partikel penembak akan mengakibatkan terbentuknya inti baru yang berbeda dengan inti asal. Inti baru ini disebut sebagai inti transmutasi.

Reaksi inti pertama dilakukan oleh Rutherford pada tahun1919, ketika ia berhasil menembakkan partikel alfa pada inti nitrogen. Reaksi tersebut menghasilkan isotop oksigen $\left({}^{17}_{8}\mathrm{O}\right)$ dan sebuah proton. Secara matematis dapat dituliskan:

$${}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

Dalam perkembangan selanjutnya, reaksi inti dilakukan dengan menembakkan partikel yang telah dipercepat dalam sebuah akselerator. Di dalam akselerator, partikel dipercepat hingga memiliki energi kinetik yang diinginkan, kemudian ditembakkan pada inti target. Akselerator dikembangkan pertama kali oleh John D Cockcroft dan Ernest Thomas S Walton dari Inggris pada tahun 1930. Dengan akselerator ini mereka berhasil menembakkan proton pada inti lithium $\left({}^{7}_{3}\mathrm{Li}\right)$ yang menghasilkan dua inti helium.

Gambar 10.10 Akselerator yang digunakan untuk mempercepat partikel elementer

Secara matematis dapat dituliskan:

$$^{7}_{3}\text{Li} + ^{1}_{1}\text{H} \rightarrow ^{4}_{2}\text{He} + ^{4}_{2}\text{He}$$

Untuk mempersingkat penulisan, reaksi inti biasanya dituliskan dalam bentuk X (a, b) Y. Sebagai contoh, reaksi inti yang dilakukan oleh Rutherford di atas dapat dituliskan sebagai:

$$^{14}_{7}\text{N}\,(\alpha,\text{p})\,^{17}_{8}\text{O}$$

Di dalam reaksi inti ada beberapa hukum kekekalan yang perlu kita perhatikan. Hukum-hukum tersebut adalah hukum kekekalan jumlah nukleon, hukum kekekalan muatan, hukum kekekalan energi, dan hukum kekekalan momentum.

a. Hukum kekekalan jumlah nukleon

Jumlah nukleon (proton + neutron) sebelum reaksi sama dengan jumlah nukleon sesudah reaksi.

Misalkan pada reaksi

$$^{A1}_{Z1}X + ^{A2}_{Z2}a \rightarrow ^{A3}_{Z3}Y + ^{A4}_{Z4}b$$

dalam hal ini berlaku:

$$A1 + A2 = A3 + A4$$

b. Hukum kekekalan muatan

Jumlah muatan (proton) sebelum dan sesudah reaksi adalah sama. Berdasarkan hukum kekekalan muatan pada reaksi di atas berlaku:

$$Z1 + Z2 = Z3 + Z4$$

c. Hukum kekekalan energi

Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa jumlah energi total (relativistik) sebelum dan sesudah reaksi adalah sama. Energi total adalah jumlah energi kinetik (K) dan energi diamnya (E_0).

Pada reaksi di atas berlaku:

$$(K_X + E_{0X}) + (K_a + E_{0a}) = (K_Y + E_{0Y}) + (K_b + E_{0b})$$
$$(K_Y + E_b) + (K_X + E_a) = (K_{0X} + E_{0a}) + (K_{0Y} + E_{0b})$$
$$(K_Y + E_b) + (K_X + E_a) = \{(m_{0X} + m_{0a}) + (m_{0Y} + m_{0b})\}c^2$$

Keterangan:

K : energi kinetik (MeV)

m_0 : massa diam inti atau partikel (MeV)

Besarnya energi reaksi dirumuskan sebagai:

$$Q = \{(m_{0X} + m_{0a}) + (m_{0Y} + m_{0b})\}c^2 \quad \ldots \quad (10.10)$$

atau

$$Q = (K_Y + E_b) + (K_X + E_a) \quad \ldots \quad (10.11)$$

Jika $Q > 0$ reaksinya disebut reaksi eksotermik. Pada reaksi eksotermik, sistem kehilangan energi massa diamnya tetapi mendapat tambahan energi kinetik. Jika $Q < 0$ reaksinya disebut reaksi endotermik.

d. Hukum kekekalan momentum

Hukum kekekalan momentum menyatakan bahwa jumlah momentum relativistik sebelum reaksi sama dengan jumlah momentum relativistik sesudah reaksi.

$$P_x + P_a = P_y + P_b$$
$$m_x v_x + m_a v_a = m_y v_y + m_b v_b$$

dengan $m = \dfrac{m_0}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$

D. Reaksi Fisi dan Reaksi Fusi

Reaksi yang terjadi pada inti atom ada dua macam, yaitu reaksi fisi dan reaksi fusi. Berikut akan kita pelajari lebih lanjut mengenai kedua reaksi tersebut.

1. Reaksi Fisi

Reaksi Fisi

Reaksi fisi adalah reaksi pembelahan inti berat menjadi inti-inti ringan disertai dengan pelepasan energi. Inti-inti baru hasil reaksi disebut sebagai fragmen fisi. Contoh reaksi fisi yang sering digunakan adalah reaksi pembelahan uranium–235 berikut.

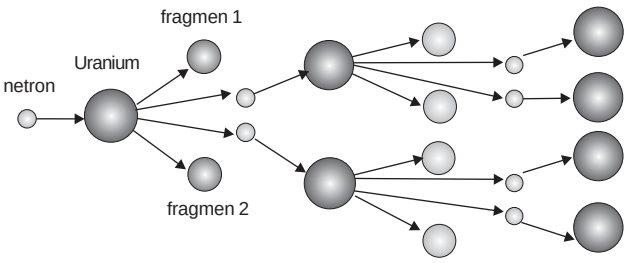
$$^{235}_{92}\text{U} + {}^{1}_{0}\text{n} \rightarrow {}^{236}_{54}\text{Xe} + {}^{94}_{38}\text{Sr} + {}^{1}_{0}\text{n} + {}^{1}_{0}\text{n}$$

Pada proses di atas, uranium–235 tereksitasi setelah menyerap neutron, kemudian uranium membelah.

Selain dengan cara di atas, reaksi fisi juga dapat terjadi dengan cara menembakkan sinar gamma atau proton pada inti target. Beberapa inti tak stabil dapat mengalami reaksi fisi secara spontan. Reaksi ini biasanya didahului dengan peluruhan sinar gamma.

Neutron yang dihasilkan akibat pembelahan pada reaksi fisi dapat menginduksi fisi, sehingga fisi dapat berjalan dengan sendirinya. Jika hal ini berlangsung tanpa kendali maka terjadi reaksi berantai dengan energi yang sangat dahsyat dan mengakibatkan kerusakan yang luar biasa, seperti pada ledakan bom atom. Karena pada reaksi fisi dilepaskan energi yang sangat besar yaitu sekitar 200 MeV untuk setiap reaksi fisi yang terjadi.

Gambar 10.11 Ledakan bom dengan hulu ledak nuklir hasil uji coba di Nevada Amerika Serikat sekitar tahun 1951 dan 1962



Gambar 10.12 Ilustrasi terjadinya reaksi fisi berantai

2. Reaksi Fusi

Reaksi Fusi

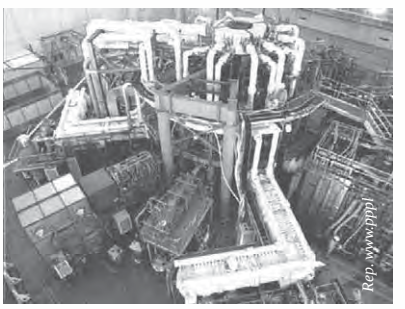
Reaksi fusi adalah reaksi penggabungan inti-inti ringan menjadi inti yang lebih berat disertai pelepasan energi. Reaksi fusi melepaskan energi sekitar 1 MeV pernukleon.

Berikut ini adalah beberapa contoh reaksi fusi.

$${}_1^1H + {}_1^2H \rightarrow {}_2^3He$$

$${}_1^1H + {}_6^{12}C \rightarrow {}_7^{13}N + \gamma$$

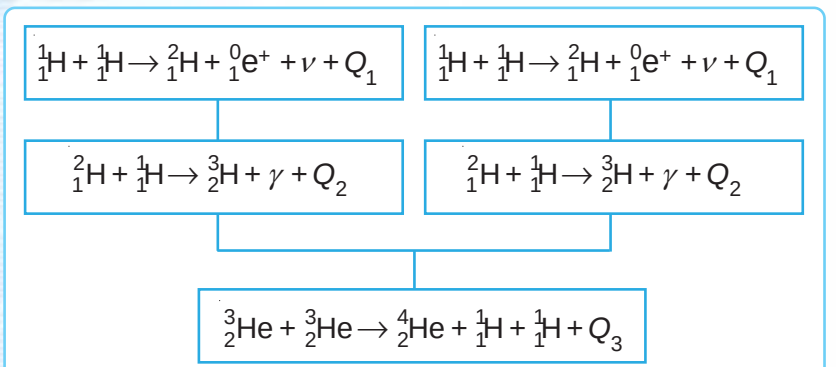
$${}_1^2H + {}_2^3He \rightarrow {}_2^4He + {}_0^1n$$



Gambar 10.13 Tokamak, sebuah reaktor fusi yang dikembangkan pada tahun 1933 di Laboratorium Fisika Universitas Princeton, New Jersey USA

Reaksi fusi dapat dilakukan dalam laboratorium dengan cara mempercepat deuteron. Reaktor fusi yang pernah dikembangkan oleh manusia antara lain JT–60 milik Jepang dan Tokamak milik Rusia.

Reaksi fusi secara alamiah terjadi di matahari. Energi dari hasil reaksi fusi menjadi sumber energi matahari dan bintang-bintang. Reaksi fusi semacam ini disebut sebagai fusi termonuklir. Diagram berikut menunjukkan mekanisme fusi pada matahari. Untuk menghasilkan reaksi fusi termonuklir tidaklah mudah. Hal ini dikarenakan reaksi termonuklir membutuhkan suhu yang sangat tinggi, yaitu sekitar 15.000.000 °C.



Keterangan:

Q_1 : 0,42 MeV

Q_2 : 5,49 MeV

Q_3 : 12,86 MeV

Gambar 10.14 Diagram mekanisme reaksi fusi pada matahari

Agar kamu lebih paham mengenai reaksi fusi, simaklah contoh soal di bawah ini!

Contoh Soal

Reaksi fusi di matahari dapat dianggap sebagai reaksi penggabungan empat buah proton menjadi inti matahari (He) dan dua buah positron. Jika diketahui ${}_1^1H$ = 1,007825 sma, ${}_2^4He$ = 4,002603 sma, ${}_1^0e^+$ = 0,000537 sma, dan 1sma = 931 MeV. Tentukanlah energi yang dihasilkan per reaksi pada fusi matahari!

Penyelesaian:

Diketahui:

${}_1^1H$ = 1,007825 sma

${}_2^4He$ = 4,002603 sma

${}_1^0e^+$ = 0,000537 sma

1 sma = 931 MeV

Ditanyakan: Q = . . .?

Jawab:

Reaksi tersebut dapat ditulis sebagai berikut.

$$4\,{}_1^1H \rightarrow {}_2^4He + 2\,{}_1^0e^+$$

Energi yang dihasilkan pada reaksi tersebut adalah:

$Q = \{4 \cdot 1{,}007825 - (4{,}002603 + 0{,}000537)\} \cdot 931\text{MeV} = 26{,}22$ MeV

Rangkuman

1. Inti atom terdiri atas proton, neutron, dan partikel-partikel elementer.
2. Massa atom terpusat pada inti atom.
3. Stabilitas inti atom bergantung pada perbandingan jumlah proton dan jumlah neutron penyusun inti atom.

$$\Delta m = \{Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n\} - m_i$$

5. Gaya inti adalah gaya khas pada inti atom yang bekerja pada jangkauan yang sangat pendek. Gaya inti mampu melawan gaya Coulomb maupun gaya atraksi.
6. Ada 3 jenis sinar radioaktif, yaitu: alfa, beta, dan gamma.
7. Mekanisme peluruhan alfa:

$${}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-2} Y + {}_2^4 He$$

8. Mekanisme peluruhan beta:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{-1}e $$

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e $$

9. Peluruhan sinar gamma terjadi karena adanya kelebihan energi pada inti atom.
10. Laju peluruhan radioaktif dinyatakan sebagai aktivitas radioaktif. Besarnya laju peluruhan radioaktif dinyatakan sebagai berikut.

$$ \frac{dN}{dt} = -\lambda N $$

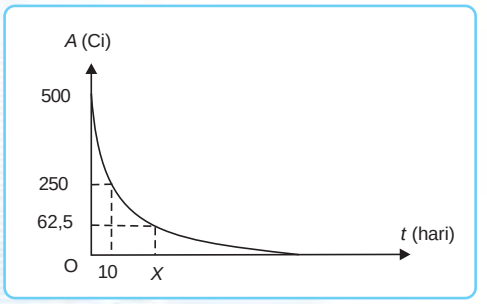
11. Waktu paruh adalah selang waktu yang diperlukan oleh suatu unsur radioaktif sehingga aktivitasnya tinggal separuh aktivitas awal.
12. Reaksi inti adalah reaksi yang terjadi akibat tumbukan inti atom dengan suatu partikel.
13. Reaksi fisi adalah reaksi pembelahan inti berat menjadi inti-inti ringan disertai dengan pelepasan energi.
14. Reaksi fusi adalah reaksi penggabungan inti-inti ringan menjadi inti yang lebih berat disertai pelepasan energi.
15. Reaktor adalah tempat berlangsungnya reaksi inti secara terkendali.

Soal-soal Uji Kompetensi

A. *Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!*

1. Dalam reaksi inti harus memenuhi . . . .
   (1) hukum kekekalan momentum
   (2) hukum kekekalan energi
   (3) hukum kekekalan nomor atom
   (4) hukum kekekalan nomor massa
   Pernyataan yang benar adalah . . . .
   a. hanya (1), (2), dan (3)
   b. hanya (1) dan (3)
   c. hanya (2) dan (4)
   d. hanya (4)
   e. (1), (2), (3), dan (4)
2. Jika massa proton dan neutron masing-masing 1,008 dan 1,009 sma maka defek massa pada inti besarnya adalah . . . .
   a. 0,012 sma
   b. 0,184 sma
   c. 0,118 sma
   d. 0,119 sma
   e. 0,120 sma
3. Stabilitas inti tergantung pada . . . .
   a. jumlah proton
   b. jumlah neutron
   c. jumlah elektron
   d. perbandingan jumlah proton dan neutron
   e. perbandingan jumlah proton dan elektron
4. Suatu partikel radioaktif diidentifikasi memiliki karakter berikut.
   1) Dibelokkan dalam medan magnet.
   2) Daya tembus rendah.
   3) Daya ionisasi rendah.
   4) Ditolak oleh benda bermuatan
   Partikel di atas kemungkinan adalah . . . .
   a. sinar alfa
   b. sinar beta
   c. positron
   d. sinar gamma
   e. neutron
5. Suatu inti ${}^{229}_{93}X$ memancarkan sinar radioaktif masing-masing 2 kali sinar alfa dan 2 kali sinar beta hingga berubah menjadi inti *Y*. Nomor atom dan nomor massa yang benar untuk *Y* adalah . . . .
   a. ${}^{229}_{91}Y$
   b. ${}^{233}_{91}Y$
   c. ${}^{229}_{89}Y$
   d. ${}^{229}_{93}Y$
   e. ${}^{233}_{93}Y$
6. Jika suatu inti radioaktif memiliki waktu paruh $3 \cdot 10^6$ tahun maka konstanta peluruhan inti tersebut adalah . . . .
   a. $2{,}31 \cdot 10^{-6}$ tahun^{-1}
   b. $2{,}31 \cdot 10^{-7}$ tahun^{-1}
   c. $2{,}31 \cdot 10^{-8}$ tahun^{-1}
   d. $2{,}31 \cdot 10^{-9}$ tahun^{-1}
   e. $2{,}31 \cdot 10^{-10}$ tahun^{-1}
7. Seorang peneliti menyimpan 100 gram sampel unsur radioaktif dengan waktu paruh 20 hari. Sisa sampel tersebut setelah 2 bulan (1 bulan = 30 hari) adalah . . . .
   a. 50 gram
   b. 25 gram
   c. 12,5 gram
   d. 6,125 gram
   e. 3,625 gram

8. Perhatikan grafik aktivitas radioaktif berikut!



Harga *X* adalah . . . .

a. 20 hari
b. 30 hari
c. 40 hari
d. 50 hari
e. 60 hari

9. Suatu unsur *X* memiliki nomor atom dan nomor massa masing-masing 87 dan 211. Berdasarkan sejarah terbentuknya unsur tersebut berasal dari . . . .

a. $^{232}_{90}Th$
b. $^{232}_{93}Np$
c. $^{238}_{92}U$
d. $^{235}_{92}U$
e. $^{236}_{92}U$

10. Persamaan reaksi inti ketika suatu inti sasaran *X* ditembak oleh sebuah partikel *a* dan menghasilkan inti *Y* serta sebuah partikel *b* dapat ditulis sebagai . . . .

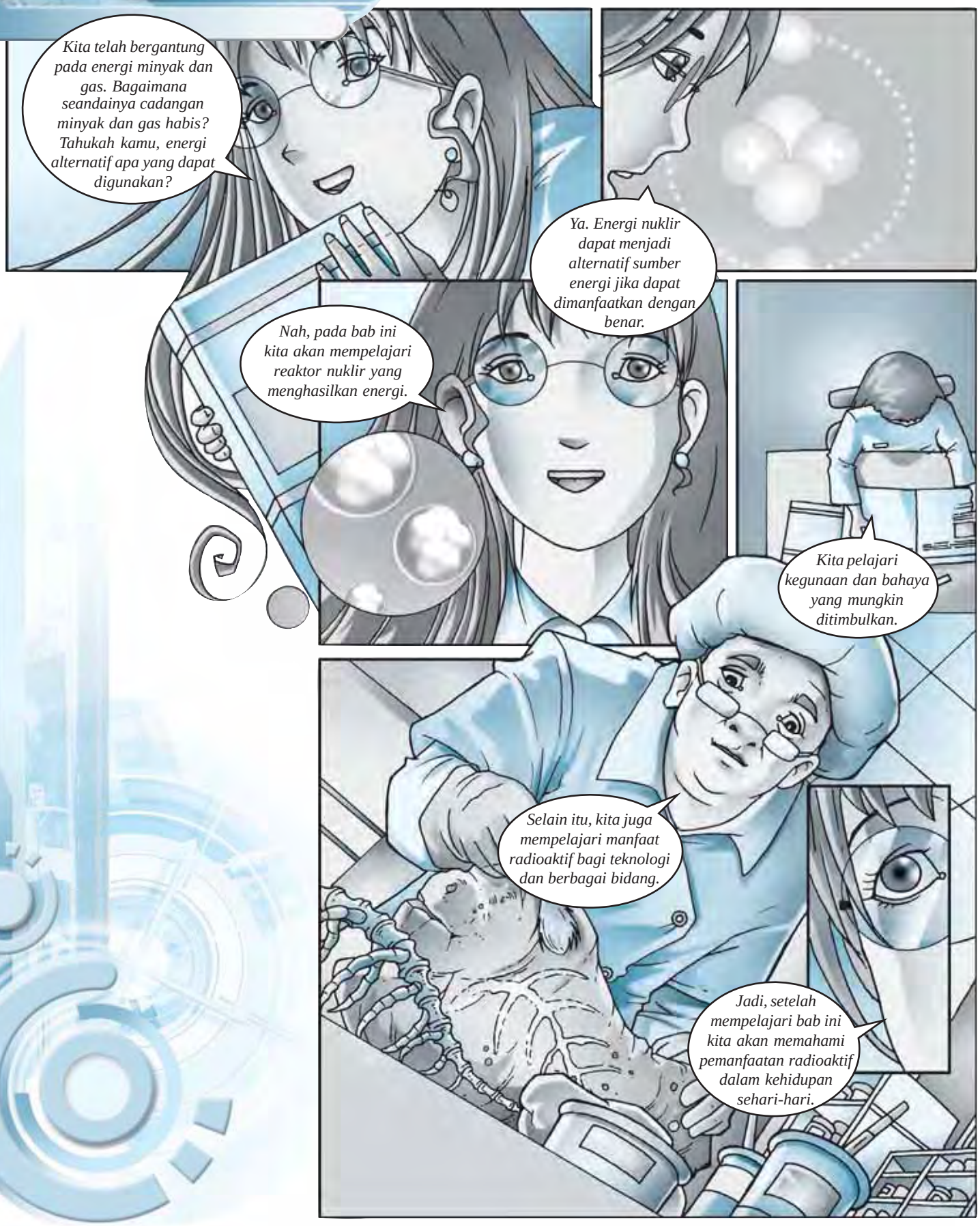
a. $X + a \rightarrow Y + b$
b. $Y + b \rightarrow X + a$
c. $a + X \rightarrow Y + b$
d. $a + X \rightarrow b + Y$
e. $b + Y \rightarrow a + X$

B. ***Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!***

1. Jika diketahui:
   massa proton ($^{1}_{1}H$) = 1,007825 sma
   massa neutron ($^{1}_{0}n$) = 1,008665 sma
   1 sma = 931,4 MeV,
   tentukanlah energi ikat dan energi ikat per nukleon dari inti $^{27}_{13}Al$ dan $^{65}_{30}Zn$!
2. Jelaskan mekanisme peluruhan yang terjadi pada inti jika ia memancarkan sinar alfa sebanyak 2 kali, beta 1 kali dan positron 1 kali. Anggaplah inti transmutasinya masing-masing adalah *A*, *B*, *C*, dan *D*!
3. Suatu batuan mengandung 25% uranium-235 dan 75% timbal. Jika waktu paruh uranium $7{,}07 \cdot 10^{8}$ tahun, berapakah umur batuan tersebut?
4. Tentukan energi ikat inti dan massa inti dari $^{197}_{79}Au$ jika energi ikat per nukleonnya 7,91 Mev!
5. Berapa waktu paruh suatu zat radioaktif jika aktivitas setelah meluruh selama 75 hari adalah $\frac{1}{32}$ aktivitas awal?

BAB 11

PENERAPAN RADIOAKTIF



Gerbang

Gambar 11.1 Reaktor nuklir sebagai sumber energi alternatif pengganti minyak dan gas

Kebutuhan energi minyak dan gas semakin hari terus bertambah. Sementara itu cadangan minyak dan gas semakin menipis. Untuk mengatasi menipisnya sumber energi minyak dan gas, kita dapat menggunakan sumber energi alternatif. Salah satu sumber energi alternatif yang dapat kita gunakan berasal dari reaktor nuklir. Reaktor nuklir memanfaatkan reaksi inti, baik reaksi fisi maupun fusi. Untuk memahami lebih jauh tentang penerapan radioaktivitas, marilah kita pelajari materi berikut!

Kata Kunci: Reaktor Nuklir – Pemanfaatan Radioisotop

A. Reaktor Nuklir

Seperti telah kita bahas pada bab 10, bahwa reaksi fisi berantai menghasilkan energi yang sangat besar. Reaksi ini sangat berbahaya jika terjadi di alam bebas karena dapat menimbulkan ledakan dan kerusakan yang sangat besar.

Reaktor Nuklir

Reaksi fisi dapat bermanfaat bagi penyediaan energi jika dapat dilakukan secara terkendali. Tempat berlangsungnya reaksi fisi terkendali ini disebut sebagai reaktor nuklir atau reaktor atom. Berikut ini adalah komponen utama sebuah reaktor nuklir.

1. Perisai radiasi

Perisai radiasi merupakan bagian reaktor yang berfungsi untuk mencegah kebocoran sinar-sinar radioaktif yang berbahaya bagi kehidupan.

2. Moderator

Moderator adalah bagian reaktor yang berfungsi untuk mengurangi energi kinetik neutron, sehingga dihasilkan neutron lambat untuk melakukan fisi berantai. Berdasarkan jenis reaktor yang digunakan, moderator ada beberapa jenis, yaitu:

a. air ringan (H_2O) untuk reaktor air didih (BWR = *Boilling Water Reactor*) dan reaktor air tekan (PWR = *Pressurized Water Reactor*);
b. air berat (D_2O) untuk reaktor air berat;
c. grafit untuk reaktor pendingin gas (HTGR = *High Temperature Gas-cooled Reactor*).

3. Bahan bakar

Bahan bakar merupakan sumber energi reaktor. Bahan bakar pada reaktor air ringan menggunakan uranium oksida (UO_2). Bahan bakar ini ditempatkan dalam tabung panjang dari kuarsa zirkonium yang dirakit bersama batang kendali yang dapat digerakkan ke dalam teras reaktor.

4. Batang kendali

Batang kendali berfungsi sebagai penyerap neutron untuk mengendalikan reaksi fisi yang terjadi (tingkat kekritisan reaktor). Batang kendali terbuat dari bahan yang mudah menyerap neutron, misalnya kadmium. Reaktor dikatakan dalam keadaan kritis jika neutron rata-rata yang melakukan reaksi sama dengan satu. Jika neutron rata-rata kurang dari satu dikatakan reaktor dalam keadaan subkritis. Jika neutron rata-rata lebih dari satu, reaktor dikatakan dalam keadaan superkritis. Keadaan ini sangat membahayakan reaktor karena dapat menyebabkan reaktor meledak. Hal ini pernah terjadi pada reaktor Chernobyl pada tahun 1986.

Sebaiknya Tahu

Rep.cernobil img.timeinc

Gambar 11.2 Kecelakaan Reaktor Chernobyl dan kota yang mati

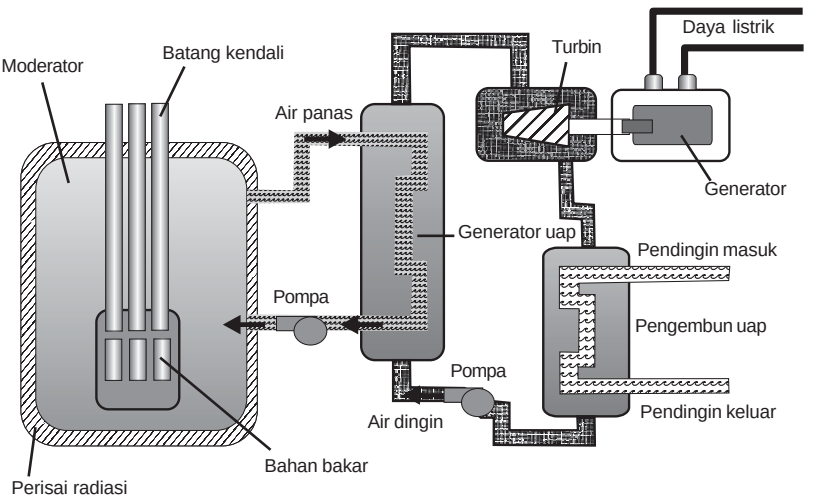
Reaktor Chernobyl

Reaktor Chernobyl adalah salah satu reaktor nuklir terbesar di Rusia (Uni Soviet pada waktu itu). Keseluruhan reaktor ini mampu menghasilkan daya listrik sebesar 1.000 megawatt.

Pada tanggal 26 April 1986 terjadi dua ledakan yang mengakibatkan rusaknya teras reaktor tersebut. Ledakan tersebut mengakibatkan terjadinya kebakaran, hamburan debu, dan kebocoran radiasi yang sangat membahayakan kehidupan. *(Sumber: Encharta Library, 2005, Microsoft, USA)*

Reaktor Daya

Reaktor daya adalah reaktor yang berfungsi sebagai pembangkit listrik (PLTN). Pada reaktor daya, energi panas yang dihasilkan dari reaktor nuklir digunakan untuk membangkitkan uap yang kemudian digunakan sebagai penggerak turbin pada pembangkit tenaga listrik.



Gambar11.3 Bagan reaktor daya jenis PWR (*Pressurized Water Reactor* = reaktor air tekan)

Gambar 11.3 menunjukkan reaktor daya dengan pendingin air tekan (tekanan air pada moderator sekitar 170 atm dengan suhu sekitar 600 K). Kalor dari teras reaktor dipindahkan ke generator uap. Uap bertekanan tinggi yang dihasilkan dari generator uap digunakan untuk menggerakkan turbin. Turbin inilah yang kemudian menggerakkan generator listrik sehingga dihasilkan energi listrik.

Efisiensi sebuah reaktor daya rata-rata sekitar 33%. Reaktor dengan daya listrik *output* 900 MW memerlukan bahan bakar sekitar 70 ton UO_2 dan beroperasi pada 2.700 MW.

Kerja Kelompok

Kerjakan bersama kelompokmu!

1. Buatlah makalah dengan tema ”Reaktor Nuklir”!
2. Makalah dibuat pada kertas A4 minimal 5 halaman.
3. Presentasikan makalah kelompokmu di depan kelas!
4. Beri kesempatan kepada kelompok lain untuk menaggapi!

B. Pemanfaatan Radioisotop

Selain digunakan sebagai reaktor nuklir, reaksi inti juga dapat digunakan dalam berbagai bidang. Pemanfaatan ini dilakukan dengan menggunakan isotop inti atom.

Inti-inti atom yang memiliki nomor atom (Z) sama tetapi nomor massa (A) berbeda disebut isotop. Isotop-isotop ini memiliki sifat kimia yang sama. Sebuah inti dapat memiliki satu atau lebih isotop. Pada umumnya isotop-isotop ini tidak stabil. Sehingga untuk menuju ke kestabilan isotop memancarkan partikel radioaktif. Isotop seperti ini disebut sebagai radioisotop atau isotop radioaktif. Beberapa contoh isotop antara lain:

Radioisotop

Isotop nitrogen : $^{14}_{7}N$ (stabil), $^{15}_{7}N$ (tak stabil)

Isotop magnesium : $^{24}_{12}Mg$ (stabil), $^{24}_{12}Mg$, $^{25}_{12}Mg$, $^{27}_{12}Mg$ (tak stabil)

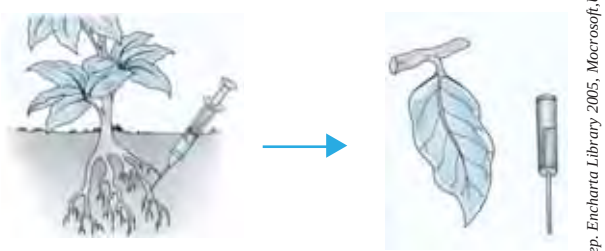
Isotop iodin : $^{127}_{12}I$ (stabil), $^{131}_{53}I$ (tak stabil)

Isotop karbon : $^{12}_{6}C$ (stabil), $^{13}_{6}C$, $^{14}_{6}C$ (tak stabil)

Radioisotop banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang, misalnya bidang pertanian, peternakan, kedokteran, dan kepurbakalaan. Berikut ini akan kita pelajari pemanfaatan radioisotop tersebut.

1. Bidang Teknologi Pertanian

Radioisotop dalam bidang pertanian dapat digunakan sebagai pelacak (*tracer*) untuk menganalisis proses fotosintesis. Perhatikan 11.4 di bawah! Misalnya isotop $^{15}_{8}O$ yang dilarutkan dalam air disuntikkan pada akar. Proses metabolisme pada tumbuhan tersebut dapat dilacak dengan menggunakan detektor radioaktif.



Rep. Encharta Library 2005, Mocrosoft.USA

Gambar 11.4 Analisis metabolisme tumbuhan menggunakan $^{15}_{8}O$

Contoh lain pemanfaatan radioisotop adalah untuk menghasilkan bibit unggul dengan iradiasi. Misalnya, varietas padi unggul hasil mutasi biji padi dengan radiasi gamma memiliki sifat tahan terhadap beberapa jenis hama dan penyakit. Begitu juga halnya dengan kacang-kacangan hasil mutasi radiasi gamma yang memiliki sifat tahan terhadap lalat putih, karat daun, bercak coklat, penyakit kudis, dan produksi per hektar lebih banyak.

Teknik iradiasi dalam bidang pertanian juga dimanfaatkan untuk mengendalikan hama serangga. Radiasi dengan dosis tertentu diberikan pada kepompong hasil pemeliharaan laboratorium. Serangga dewasa yang terbentuk dari kepompong tersebut bersifat mandul. Serangga tersebut kemudian dilepas ke lahan pertanian untuk mengawini serangga normal. Perkawinan ini tidak akan menghasilkan keturunan. Dengan demikian, populasi serangga tersebut dapat dikendalikan.

2. Bidang Teknologi Peternakan

Penggunaan teknik nuklir dalam penelitian dan pengembangan bidang peternakan memerlukan kepekaan deteksi tinggi dan akurat agar diperoleh hasil perunutan yang efektif, efisien, aman, dan ekonomis. Perunutan merupakan proses pemanfaatan senyawa yang ditandai dengan radioisotop untuk mengetahui mekanisme suatu sistem biologi.

Pemanfaatan teknik nuklir untuk perunutan berdasarkan sifat pengaplikasiannya dibagi menjadi dua, yaitu pemanfaatan yang bersifat *in vivo* dan *in vitro*. Aplikasi perunutan secara *in vivo* bertujuan untuk menggambarkan proses biologi yang terjadi di lingkungan asalnya. Pada proses *in vivo*, radioisotop diberikan langsung pada hewan ternak. Yang perlu diperhatikan pada proses *in vivo* adalah waktu paruh biologi, yaitu waktu yang diperlukan radioisotop untuk keluar atau diekskresikan keluar tubuh.

Gambar 11.5 Suplemen pakan UMMB

Adapun aplikasi perunutan secara *in vitro* bertujuan untuk menggambarkan proses biologi yang terjadi di luar tubuh hewan, misalnya di laboratorium. Yang perlu diperhatikan pada proses *in vitro* adalah waktu paruh fisika, yaitu waktu yang diperlukan oleh radioisotop untuk meluruh hingga mencapai separuh aktivitasnya.

Hasil-hasil teknologi Badan Tenaga Nuklir Nasional (Batan) yang memanfaatkan teknik perunutan adalah suplemen pakan *urea multinutrient molasses block* (UMMB) dan *radioimmuno assay* (RIA).

Suplemen pakan UMMB merupakan suplemen pakan (SP) untuk ternak ruminansia, seperti sapi, kerbau, kambing, dan domba. Ciri khas dari ternak ruminansia adalah adanya rumen yang merupakan ekosistem mikroba yang berperan dalam penguraian bahan pakan.

Mikroba berfungsi sebagai bahan protein bagi ternak. Agar teknologi suplemen tersebut dapat diterapkan oleh peternak dan mudah dalam penyimpanan serta transportasinya maka suplemen tersebut dibuat dalam bentuk padat dari komposisi bahan tertentu. Misalnya urea, dedak, onggok, tepung tulang, lakta mineral, garam dapur, tepung kedelai, dan kapur.

Pemanfaatan teknik nuklir radiasi yang dilakukan di bidang peternakan terutama di bidang kesehatan ternak, yaitu untuk melemahkan patogenisitas penyakit yang disebabkan oleh bakteri, virus, dan cacing. Lembaga penelitian dan pengembangan pemanfaatan radiasi, telah menghasilkan radiovaksin, reagen diagnostik, dan pengawetan.

Radiovaksin adalah teknik pembuatan vaksin dengan cara iradiasi. Pembuatan radiovaksin memiliki keunggulan dibandingkan dengan cara konvensional, yaitu mempercepat proses pembuatan vaksin dengan memperpendek waktu pasasel. Selain itu, radiovaksin yang diproduksi memiliki kualitas yang sama dengan vaksin buatan secara konvensional.

Sumber radiasi yang digunakan untuk pembuatan radiovaksin adalah sinar gamma. Sinar gamma digunakan untuk menurunkan infektivitas, virulensi, dan patogenitas agen penyakit yang diharapkan mampu merangsang timbulnya kekebalan tubuh terhadap infeksi penyakit.

Kerja Berpasangan

1. Buatlah makalah tentang pemanfaatan radioaktif dalam bidang pertanian dan peternakan!
2. Presentasikan makalahmu di depan kelas!
3. Beri kesempatan kepada teman-temanmu untuk menanggapi!

3. Bidang Kedokteran

Pemanfaatan radioaktif dalam bidang kedokteran dikenal sebagai kedokteran nuklir (*nuclear medicine*). Kedokteran nuklir merupakan bidang kedokteran yang khusus menggunakan teknologi nuklir, baik untuk diagnosis maupun pengobatan.

Misalnya seperti diuraikan berikut ini.

a. Teknik Pengaktifan Neutron

Teknik ini dapat digunakan untuk menentukan kandungan mineral tubuh terutama untuk unsur-unsur yang terdapat dalam tubuh dengan jumlah yang sangat kecil (Co, Cr, F, Mn, Se, Si, V, Zn, dan lain-lain). Oleh karena itu, kandungan mineral tubuh sulit ditentukan dengan metode konvensional. Kelebihan teknik ini terletak pada sifatnya yang tidak merusak dan kepekaan yang sangat tinggi.

b. Penentuan Kerapatan Tulang dengan *Bone Densitometer*

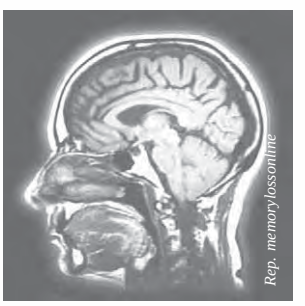
Pengukuran kerapatan tulang dilakukan dengan cara menyinari tulang dengan radiasi gamma atau sinar-X. Berdasarkan banyaknya radiasi gamma atau sinar-X yang diserap tulang yang diperiksa dapat ditentukan konsentrasi mineral kalsium dalam tulang. Perhitungan dilakukan oleh komputer yang dipasang pada alat *bone densitometer* tersebut. Teknik ini bermanfaat sebagai alat bantu diagnosis kekeroposan tulang (osteoporosis).

c. *Three Dimensional Conformal Radiotherapy* (3D-CRT)

Terapi radiasi dengan menggunakan sumber radiasi tertutup atau pesawat pembangkit radiasi sudah lama dikenal untuk pengobatan penyakit kanker. Perkembangan teknik elektronika dan peralatan komputer telah membawa perkembangan pesat dalam teknologi radioterapi. Dengan menggunakan pesawat pemercepat partikel generasi terakhir telah dimungkinkan untuk melakukan radioterapi kanker dengan sangat presisi dan tingkat keselamatan yang tinggi. Alat tersebut mampu dengan sangat selektif membatasi bentuk jaringan tumor yang akan dikenai radiasi, memformulasikan serta memberikan paparan radiasi dengan dosis yang tepat pada target.

Dengan memanfaatkan teknologi 3D-CRT ini sejak tahun 1985 telah berkembang metode pembedahan dengan radiasi pengion sebagai pisau bedahnya (*gamma knife*). Kasus-kasus tumor ganas yang sulit dijangkau dengan pisau bedah konvensional menjadi dapat diatasi dengan teknik ini. Bahkan, tanpa perlu membuka kulit pasien dan tanpa merusak jaringan di luar target berbagai kasus banyak teratasi.

Salah satu penggunaan radioisotop dalam kedokteran adalah dikembangkannya *Positron Emission Tomography* (PET) atau *Magnetic Resonance Imaging* (MRI). Dengan menganalisis penyebaran zat radioaktif yang disuntikkan pada pasien, dokter dapat melakukan deteksi dini kelainan fungsi organ tubuh pasien, terutama organ tubuh yang sangat peka misalnya otak, pembuluh darah, dan hati. Dengan alat ini memungkinkan dokter mendapatkan gambar tiga dimensi organ tubuh pasien sehingga mempermudah diagnosis.

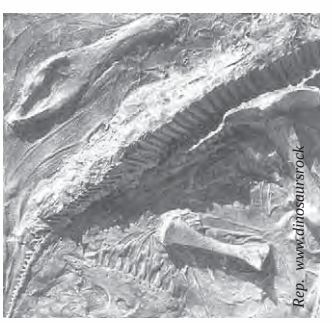


Gambar 11.6 Tampilan gambar otak manusia dari MRI

Selain itu, pancaran sinar gamma juga digunakan untuk pengobatan berbagai penyakit, terutama kanker.

4. Bidang Kepurbakalaan

Radioisotop dalam bidang kepurbakalaan digunakan untuk menentukan umur suatu fosil. Dengan menganalisis kandungan isotop karbon–14 pada fosil, para ahli dapat memperkirakan umur fosil (tumbuhan atau hewan yang telah mati dan membatu) atau peninggalan zaman purba.



Gambar 11.7 Fosil peninggalan jaman purba dapat diperkirakan umurnya dengan mengetahui kandungan isotop karbon-14

Penentuan umur dengan menggunakan radiokarbon bergantung pada pembentukan karbon–14 di bagian atas atmosfer. Reaksi pembentukan karbon–14 adalah sebagai berikut.

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}H$$

Berdasarkan persamaan reaksi di atas terjadi konversi nitrogen menjadi karbon–14 yang bersifat radioaktif. Karbon–14 memiliki waktu paruh 5.730 tahun dan meluruh dengan persamaan berikut.

$$^{14}_{6}C \rightarrow ^{0}_{-1}e + ^{14}_{7}N$$

Atom-atom karbon–14 tunggal yang dihasilkan di atmosfer bagian atas bergabung dengan oksigen untuk membentuk karbondioksida. Karbondioksida ini digunakan oleh tumbuh-tumbuhan untuk berfotosintesis. Tumbuh-tumbuhan ini dimakan oleh hewan, sehingga karbon–14 ikut masuk ke dalam rantai makanan. Penentuan umur fosil dilakukan dengan mengasumsikan bahwa persentase karbon–14 di atmosfer adalah konstan dan bahwa radiokarbon dalam semua organisme hidup berada dalam kesetimbangan dengan atmosfer.

Jika asumsi-asumsi ini benar, persentase karbon–14 dalam organisme hidup akan sama dengan persentase karbon–14 di atmosfer. Ketika tumbuhan dan hewan mati, kesetimbangannya dengan atmosfer juga berhenti, dan karbon–14 dalam tubuh organisme mulai meluruh. Jumlah karbon–14 yang tersisa dapat digunakan untuk memperkirakan umur fosil.

C. Dosis Radiasi

Pemanfaatan radioisotop pada pembahasan di atas harus dilakukan dengan dosis radiasi tertentu. Jika dosis radiasi yang kita berikan tidak sesuai maka hasil yang kita peroleh juga tidak sesuai dengan yang kita harapkan.

Dosis radiasi didefinisikan sebagai banyaknya energi radiasi yang diserap tiap satu satuan massa zat. Satuan dosis radiasi dalam SI adalah gray (Gy). (1 gray = 1 joule / kg = 100 rad)

$$\text{Dosis radiasi} = \frac{\text{energi}}{\text{massa}} \qquad \ldots (11.3)$$

Setiap jenis radiasi pada tingkat tertentu berpotensi menyebabkan tingkat kerusakan yang berbeda terhadap jaringan hidup. Potensi kerusakan akibat radiasi tertentu dinyatakan sebagai faktor kualitas (QF). Dalam hal ini pembandingnya adalah dosis radiasi 1 gray sinar-X pada 200 keV. Misalnya, jika 10 gray radiasi tertentu menyebabkan kerusakan tujuh kali lebih besar dari 10 gray sinar-X pada 200 keV maka faktor kualitasnya adalah 7.

Sering kali faktor kualitas radiasi dinyatakan sebagai RBE (*relative biological effectiveness* = keefektifan biologis relatif). Tabel berikut menunjukkan potensi kerusakan akibat radiasi radioaktif.

Tabel 11.1 Potensi Kerusakan akibat Radiasi Radioaktif

No.	Dosis Radiasi	Tingkat Kerusakan
1.	> 40 gray	Kerusakan pada sistem jantung, kelebihan cairan otak (*hydrocepalus*), gangguan sirkulasi darah sebagai penyebab *shock*. Hal ini dapat menyebabkan kematian dalam selang waktu 48 jam.
2.	10 – 40 gray	Kerusakan pada jantung akibat kekurangan cairan elektrolit pada sel dan gagal ginjal. Hal ini dapat menyebabkan kematian dalam selang waktu 10 hari.
3.	1,5 – 10 gray	Kerusakan pada jaringan tulang. Kematian pada selang waktu 4 – 5 minggu sejak teradiasi.

Sumber: Encharta Library 2005, Microsoft,USA

Kerja Mandiri

Kerjakan soal berikut ini dengan tepat!

1. Sebutkan jenis isotop yang digunakan sebagai:
   a. *tracer*
   b. *bone densitometer*
   c. pengobatan penyakit
   d. penentu umur fosil
2. Sebutkan pemanfaatn radioisotop dalam bidang selain yang tersebut di atas!

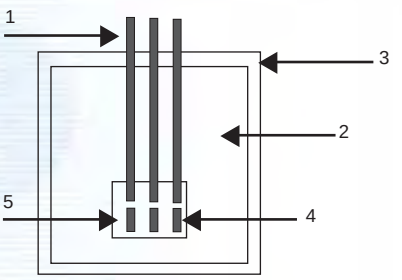
Rangkuman

1. Reaktor adalah tempat berlangsungnya reaksi inti secara terkendali.
2. Komponen utama, sebuah reaktor nuklir adalah:
   a. perisai radiasi
   b. moderator
   c. bahan bakar
   d. batang kendali
3. Inti-inti atom yang memiliki nomor atom (Z) sama tetapi nomor massa (A) berbeda disebut isotop.
4. Penggunaan isotop dewasa ini berkembang di berbagai bidang, antara lain:
   a. pertanian
   b. peternakan
   c. kedokteran
   d. kepurbakalaan

Soal-soal Uji Kompetensi

A. *Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!*

1. Jenis reaktor berdasarkan bahan moderator yang digunakan adalah . . . .
   a. reaktor daya
   b. reaktor fusi
   c. reaktor radioisotop
   d. reaktor PWR
   e. reaktor serba guna
2. Komponen reaktor yang berfungsi untuk menyerap energi kinetik netron adalah . . . .
   a. perisai radiasi
   b. batang kendali
   c. moderator
   d. pembangkit uap
   e. pendingin sekunder
3. Perhatikan bagan reaktor berikut!



   Bagian reaktor yang berfungsi untuk menyerap neutron adalah….
   a. 1
   b. 2
   c. 3
   d. 4
   e. 5
4. Suatu reaktor daya yang memiliki efisiensi 25 % menghasilkan 1000 MW. Massa bahan bakar yang diperlukan setiap detiknya adalah . . . .
   a. $0{,}4 \cdot 10^{-8}$ kg
   b. $1{,}4 \cdot 10^{-8}$ kg
   c. $2{,}4 \cdot 10^{-8}$ kg
   d. $3{,}4 \cdot 10^{-8}$ kg
   e. $4{,}4 \cdot 10^{-8}$ kg
5. Suatu limbah nuklir memiliki waktu paruh 10 tahun. Selang waktu yang diperlukan agar aktivitasnya menjadi $\frac{1}{4}$ mula-mula adalah . . . .
   a. 10 tahun
   b. 20 tahun
   c. 30 tahun
   d. 40 tahun
   e. 50 tahun
6. Reaktor nuklir masa depan yang diharapkan aman dari dampak radiasi radioaktif adalah reaktor . . . .
   a. fusi
   b. fisi
   c. serba guna
   d. HTGR
   e. PWR
7. Berikut ini adalah penggunaan radioisotop pada bidang pertanian, **kecuali** . . . .
   a. menghasilkan pupuk
   b. menghasilkan bibit unggul
   c. membunuh hama melalui pemandulan hama pejantan
   d. pengawetan hasil pertanian
   e. meningkatkan hasil pertanian melalui rekayasa genetika pada tanaman
8. Penentuan umur fosil dilakukan dengan menggunakan isotop . . . .
   a. nitrogen–14
   b. karbon–14
   c. sinar gamma
   d. sinar-X
   e. oksigen–8

9. Batang kendali pada reaktor nuklir berfungsi untuk . . . .
   a. menurunkan energi neutron
   b. penyerap neutron
   c. untuk menahan radiasi
   d. memindahkan panas
   e. mengendalikan moderator
10. Dosis radiasi yang menyebabkan kekurangan cairan elektrolit pada sel berada pada rentang . . . .
   a. 0–1,5 gray
   b. 1,5–10 gray
   c. 10–40 gray
   d. 40–100 gray
   e. > 100 gray

B. ***Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!***

1. Sebut dan jelaskan komponen utama sebuah reaktor nuklir!
2. Sebutkan bagian-bagian dari reaktor daya dan jelaskan masing-masing fungsinya!
3. Apa yang dimaksud dengan radio-isotop? Jelaskan penerapan radio-isotop dalam bidang pertanian!
4. Suatu limbah nuklir memiliki waktu paruh 10 tahun. Berapakah waktu yang diperlukan agar aktivitas limbah tersebut menjadi $\frac{1}{8}$ mula-mula?
5. Sebut dan jelaskan potensi kerusakan akibat radiasi radioaktif!

Soal-soal Akhir Semester 2

A. *Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!*

1. Dua pesawat antariksa masing-masing *A* dan *B* bergerak saling berlawanan. Seorang pengamat di bumi mengukur kelajuan pesawat *A* adalah 0,6 *c* dan kelajuan pesawat *B* adalah 0,8 *c*. Besarnya kelajuan pesawat *B* relatif terhadap pesawat *A* adalah . . . .
   a. 0,20 *c*
   b. 0,60 *c*
   c. 0,80 *c*
   d. 0,95 *c*
   e. 1,40 *c*
2. Panjang suatu jembatan diukur oleh pengamat yang diam di bumi adalah 1.000 m. Panjang jembatan tersebut bila diukur oleh pengamat yang ada di dalam pesawat antariksa yang bergerak dengan kecepatan 0,6 *c* adalah . . . .
   a. 300 m
   b. 400 m
   c. 600 m
   d. 800 m
   e. 1.000 m
3. Ledakan gunung berapi diukur oleh pengamat yang diam di bumi berlangsung selama 160 menit. Selang waktu ledakan tersebut bila diukur oleh pengamat yang ada di dalam pesawat antariksa yang bergerak dengan kecepatan 0,6 *c* adalah . . . .
   a. 96 menit
   b. 128 menit
   c. 160 menit
   d. 200 menit
   e. 266,6 menit
4. Suatu permukaan benda hitam memiliki suhu *T* Kelvin sehingga memancarkan energi sebesar *W* Joule. Jika suhu permukaan benda hitam tersebut dinaikkan menjadi 2*T* Kelvin maka energi yang dipancarkan adalah . . . .
   a. $\frac{1}{4}$ *W*J
   b. $\frac{1}{2}$ *W*J
   c. 2 *W*J
   d. 4 *W*J
   e. 16 *W*J
5. Suhu permukaan suatu benda hitam adalah 27 °C. Panjang gelombang yang bersesuaian dengan radiasi maksimum yang dipancarkan permukaan tersebut adalah . . . .
   a. $2{,}9 \times 10^{-6}$ m
   b. $4{,}8 \times 10^{-6}$ m
   c. $5{,}9 \times 10^{-6}$ m
   d. $7{,}7 \times 10^{-6}$ m
   e. $9{,}7 \times 10^{-6}$ m
6. Energi dari suatu foton yang memiliki frekuensi 2×10^{14} Hz adalah . . . .
   a. $1{,}6 \times 10^{-20}$ J
   b. $3{,}3 \times 10^{-20}$ J
   c. $6{,}6 \times 10^{-20}$ J
   d. $13{,}2 \times 10^{-20}$ J
   e. $26{,}4 \times 10^{-20}$ J
7. Suatu permukaan logam disinari dengan cahaya yang panjang gelombangnya 600 nm. Jika fungsi kerja logam tersebut adalah 1 eV maka energi kinetik foto elektron yang dipancarkan adalah . . . .
   a. $1{,}7 \times 10^{-19}$J
   b. $3{,}4 \times 10^{-19}$J
   c. $6{,}6 \times 10^{-19}$J
   d. $8{,}5 \times 10^{-19}$J
   e. $9{,}2 \times 10^{-19}$J

8. Sebuah elektron bergerak dengan kecepatan 3,3 x 10^7 m/s. Panjang gelombang yang ditimbulkan elektron tersebut adalah . . . .
   a. $2{,}1 \times 10^{-11}$ m
   b. $4{,}2 \times 10^{-11}$ m
   c. $4{,}8 \times 10^{-11}$ m
   d. $6{,}6 \times 10^{-11}$ m
   e. $6{,}8 \times 10^{-11}$ m

9. Massa atom karbon $^{12}_{6}C$ adalah 12,000000 sma. Jika massa proton 1,007276 sma, massa neutron 1,008665 sma, dan massa elektron 0,000549 sma maka energi ikat inti atom karbon adalah . . . .
   a. 16,70 MeV
   b. 66.67 MeV
   c. 92,16 MeV
   d. 93,15 MeV
   e. 98,16 MeV

10. Suatu zat radioaktif memerlukan waktu 3,465 hari agar jumlah zat yang tersisa tinggal setengah dari jumlah semula. Tetapan peluruhan zat tersebut adalah . . . .
   a. $0{,}5 \times 10^{-1}$/hari
   b. 2×10^{-1}/hari
   c. 4×10^{-1}/hari
   d. 5×10^{-1}/hari
   e. 6×10^{-1}/hari

11. Berikut ini adalah sifat-sifat sinar katoda, **kecuali** . . . .
   a. dipengaruhi medan magnetik
   b. merupakan gelombang elektromagnetik
   c. bermuatan negatif
   d. merambat menurut garis lurus
   e. berfluoresensi

12. Menurut de Broglie, suatu partikel dapat berperilaku sebagai gelombang cahaya. Panjang gelombang partikel tersebut adalah . . . .
   a. berbanding lurus dengan massa dan laju perambatannya
   b. berbanding lurus dengan massa dan tetapan Planck
   c. berbanding terbalik dengan tetapan Planck dan laju perambatannya
   d. berbanding terbalik dengan tetapan Planck dan massanya
   e. berbanding terbalik dengan massa dan laju perambatannya

13. Berikut ini menunjukkan transisi elektron dalam sebuah atom hidrogen. Dalam transisi tersebut yang memancarkan foton dengan panjang gelombang paling pendek adalah . . . .
   a. dari $n = 1$ ke $n = 2$
   b. dari $n = 1$ ke $n = 3$
   c. dari $n = 2$ ke $n = 1$
   d. dari $n = 2$ ke $n = 6$
   e. dari $n = 6$ ke $n = 2$

14. Berikut ini adalah urutan daya tembus dari sinar-sinar radioaktif dimulai dari yang paling lemah ke paling kuat, yaitu . . . .
   a. gamma, alfa, beta
   b. alfa, gamma, beta
   c. alfa, beta, gamma
   d. beta, gamma, alfa
   e. gamma, beta, alfa

15. Dua benda hitam identik dipanaskan masing-masing pada suhu 1.000 K dan 2.000 K. Perbandingan jumlah energi yang dipancarkan dalam bentuk radiasi sekon oleh permukaan kedua benda hitam tersebut adalah . . . .
   a. 1 : 1
   b. 1 : 2
   c. 1 : 4
   d. 1 : 16
   e. 16 :1

16. Sebuah benda memiliki massa diam 10 kg. Benda tersebut bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya (c). Energi kinetik benda tersebut saat massa benda menjadi 12,5 kg adalah . . . .
    a. 2,5 c^2
    b. 5 c^2
    c. 6,25 c^2
    d. 12,5 c^2
    e. 15 c^2
17. Lampu natrium 15 W memancarkan cahaya dengan panjang gelombang 663 nm. Jumlah foton yang dipancarkan lampu tersebut tiap sekon adalah ...
    a. $2 \cdot 10^{18}$ foton
    b. $3 \cdot 10^{18}$ foton
    c. $4 \cdot 10^{19}$ foton
    d. $5 \cdot 10^{19}$ foton
    e. $6 \cdot 10^{19}$ foton
18. Suatu permukaan logam memiliki fungsi kerja 2,21 eV.Panjang gelombang ambang sinar untuk logam tersebut adalah . . . .
    a. 188 nm
    b. 375 nm
    c. 563 nm
    d. 750 nm
    e. 938 nm
19. Berdasarkan percobaan Compton dapat disimpulkan bahwa setelah foton bertumbukan dengan elektron maka . . . .
    a. panjang gelombang foton menjadi lebih kecil
    b. energi foton bertambah
    c. frekuensi foton menjadi lebih besar
    d. panjang gelombang foton menjadi lebih besar
    e. energi dan frekuensi foton menjadi lebih besar
20. Dalam suatu reaktor yang berfungsi untuk menurunkan energi neutron adalah . . . .
    a. perisai radiasi
    b. pompa fluida
    c. batang kendali
    d. moderator
    e. pendingin
21. Jarak bumi dengan bintang yang jari-jarinya $2 \cdot 10^3$ adalah $2{,}25 \cdot 10^{11}$ m. Jika suhu permukaan bumi 300 K maka suhu permukaan bintang tersebut adalah . . . .
    a. $4{,}5 \cdot 10^3$ m
    b. $4{,}5 \cdot 10^4$ m
    c. $4{,}5 \cdot 10^5$ m
    d. $4{,}5 \cdot 10^6$ m
    e. $4{,}5 \cdot 10^7$ m
22. Panjang gelombang garis ketiga dari deret Brackett adalah . . . .
    a. $2{,}16 \cdot 10^{-3}$
    b. $2{,}16 \cdot 10^{-4}$
    c. $2{,}16 \cdot 10^{-5}$
    d. $2{,}16 \cdot 10^{-6}$
    e. $2{,}16 \cdot 10^{-7}$
23. Jumlah proton, neutron, dan elektron dalam atom $^{27}_{13}Al$ adalah . . . .
    a. 13, 14, 13
    b. 13, 13, 14
    c. 14, 13, 13
    d. 13, 15, 12
    e. 15, 12, 13
24. Setelah 0,5 jam, suatu unsur radioaktif menjadi $\frac{1}{16}$ bagian mula-mula. Waktu paruh unsur tersebut adalah . . . .
    a. 7,5 menit
    b. 75 menit
    c. 15 menit
    d. 1,25 menit
    e. 0,125 menit

25. Dua deuteron bereaksi fusi menghasilkan triton dan sebuah proton. Jika massa inti deuteron 2,014102 sma, triton 3,016049 sma, dan proton 1,007825 sma maka energi yang dibebaskan adalah . . . .
    a. 2,017 MeV
    b. 2,020 eV
    c. 2,020 MeV
    d. 4,033 eV
    e. 4,033 MeV

B. *Kerjakan soal-soal berikut dengan tepat!*

1. Seorang pilot yang sedang mengendarai pesawat penjelajah angkasa dengan kecepatan konstan 0,8 *c* meninggalkan bumi. Pilot tersebut menembakkan peluru kendali dengan kecepatan 0,6 *c* relatif terhadap pesawat dan searah dengan arah gerak pesawat. Tentukan kecepatan peluru tersebut terhadap pengamat di bumi!
2. Sebuah logam dengan emisivitas 0,4 dipanaskan hingga suhu 700 K. Tentukan:
    a. intensitas radiasi yang dipancarkan,
    b. panjang gelombang pada intensitas maksimum.
3. Suatu zat radioaktif mengandung 6,4 μg isotop murni $^{12}_{6}C$. Jika tetapan peluruhan isotop tersebut 0,0231/menit, tentukan:
    a. waktu paruhnya,
    b. massa zat tersebut setelah 2 jam.
4. Dengan menggunakan teori relativitas, hitunglah laju hilangnya massa matahari pada titik yang berjarak $1,5 \cdot 10^{10}$ m jika intensitas matahari di titik tersebut adalah $0,6 \cdot 10^{3}$ W/m^2!
5. Sebuah pelat baja tipis berbentuk persegi mempunyai panjang sisi 20 cm. Pelat tersebut dipanasi hingga suhunya mencapai 727 °C. Jika pelat tersebut dianggap benda hitam sempurna maka tentukan laju rata-rata energi radiasi yang dipancarkan pelat tersebut!
6. Jarak planet mars dari matahari adalah $2,491 \cdot 10^{9}$ km. Jika massa matahari $1,99 \cdot 10^{30}$ kg, tentukan kecepatan mars mengelilingi matahari dan kala revolusi!
7. Seorang astronaut bergerak menuju sebuah planet dengan kecepatan 0,6 c. Dengan menggunakan transformasi Lorentz, hitunglah persentase pertambahan massa astronaut tersebut!
8. Hitunglah panjang gelombang garis kedua dari deret:
    a. Lyman,
    b. Balmer,
    c. Paschen,
    d. Brackett,
    e. Pfund.
9. Tentukan energi ikat inti dan defek massa dari atom-atom berikut.
    a. $^{31}_{15}P$ jika energi ikat per nukleonnya 8,48 Mev,
    b. $^{81}_{35}Br$ jika energi ikat per nukleonnya 8,69 Mev.
10. Sebutkan penerapan penggunaan radioisotop dalam berbagai bidang!

Glosarium

akselerator	:	alat untuk mempercepat suatu partikel sebelum digunakan untuk menembak suatu target sehingga terjadi reaksi inti
amplitudo gelombang	:	simpangan maksimum gelombang
arus bolak-balik	:	arus yang mengalami pembalikan fase positif dan negatif
bilangan kuantum	:	suatu bilangan yang menunjukkan keadaan elektron pada suatu kulit maupun subkulit
dilatasi waktu	:	peristiwa di mana waktu akan berjalan lebih lambat jika dilihat dari acuan yang bergerak relatif terhadap kerangka acuan diam
efek Zeeman	:	efek kuantisasi ruang suatu elektron akibat pengaruh medan magnetik eksternal
fase gelombang	:	keadaan gelombang pada suatu saat terhadap keadaan setimbangnya
fase	:	keadaan sesaat suatu gelombang
fasor	:	vektor untuk menggambarkan fase gelombang
fisika klasik	:	konsep-konsep fisika yang mengacu pada mekanika Newton
fisika relativistik	:	konsep-konsep fisika yang mengacu pada fisika relativistik
frekuensi resonansi	:	frekuensi yang timbul pada rangkaian arus bolak-balik ketika harga reaktansi induktif sama dengan harga reaktansi kapasitif
frekuensi	:	jumlah gelombang yang melalui suatu titik per satuan waktu
garis gaya listrik	:	disebut juga garis medan listrik, yaitu garis khayal yang menunjukkan keberadaan medan listrik
gelombang berjalan	:	gelombang yang merambat sepanjang medium tanpa mengalami pemantulan
gelombang stasioner ujung bebas	:	gelombang stasioner di mana pada ujung pantulnya dapat bergerak bebas
gelombang stasioner	:	hasil superposisi gelombang datang dengan gelombang pantul
hukum Biot-Savart	:	hukum yang menyatakan bahwa kuat medan magnet induksi di sekitar arus listrik sebanding dengan kuat arus listrik pada penghantar
impedansi	:	resultan hambatan yang timbul pada rangkaian arus bolak-balik
inti tereksitasi	:	inti hasil peluruhan yang memiliki tingkat energi yang seharusnya
kaidah tangan kanan	:	kaidah untuk menentukan arah medan magnetik di sekitar arus listrik
koefisien emisivitas	:	keofisien yang menunjukkan karakteristik pancaran radiasi termal berharga antara 0 sampai dengan 1
konsentris	:	sama pada arah radial
konstanta kisi	:	jarak dua celah yang berdampingan pada kisi difraksi
kontraksi panjang	:	peristiwa dimana ukuran panjang akan terkesan lebih pendek jika diukur dari titik acuan yang bergerak relatif terhadap benda
magnetisme	:	segala gejala yang berhubungan dengan kemagnetan
mekanika kuantum	:	bagian dari fisika yang mempelajari gejala pada partikel dan gelombang berdasarkan konsep kuantum
meson	:	partikel elementer yang ditemukan oleh fisikawan Jepang Hideki Yukawa pada tahun1930

momen gaya : hasil kali gaya dengan jarak suatu titik terhadap garis kerja gaya. Momen gaya menyebabkan suatu benda berotasi.

muatan uji : muatan khayal yang diletakkan di suatu titik di sekitar medan listrik.

oscilator : pembangkit gelombang elektromagnetik

periode : waktu yang diperlukan satu panjang gelombang untuk melalui suatu titik

polaroid : suatu zat yang mengakibatkan arah getar gelombang cahaya terkutub (terpolarisasi) pada getar tertentu

pulsa : gangguan yang diberikan pada suatu benda hingga benda bergetar

reaksi termonuklir : reaksi nuklir yang memerlukan suhu tinggi untuk memulainya

reaktansi : hambatan yang bersifat spesifik pada kapasitor maupun induktor ketika dilalui arus bolak-balik

resonansi : keadaan di mana medium ikut bergetar bersama sumber bunyi

simpangan : jarak suatu titik pada gelombang terhadap titik setimbangnya

sinar biasa : sinar yang tunduk pada hukum Snellius

sinar luar biasa : sinar yang menyimpang dari hukum Snellius, terjadi pada pembiasan ganda

spektrum hidrogen : pita gelombang elektromagnetik yang muncul pada atom hidrogen karena transisi elektron dari orbit tingkat tinggi ke orbit yang lebih rendah

vibrator : sumber getaran

Indeks

A

Albert Einstein 152, 153, 157, 168
Albert Michelson 155
amperemeter 101
amplitudo 5, 8, 9, 10, 13, 14, 16, 27
anode 133
arus bolak-balik 96, 98, 99 ,101, 104, 109, 110, 111, 112
arus induksi 96, 109
arus listrik 80, 82, 83, 96, 98, 104, 109
arus searah 100, 101, 103, 109
arus sinusoidal 99, 100, 101, 111
atom 132, 134, 135, 138, 143, 144, 145, 146, 147
atom berelektron banyak 142, 146
audio 22

B

beda potensial 58, 66, 68, 69, 71, 73, 74, 96, 104, 132
bencana ultraungu 124, 125
benda hitam 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128
Benjamin Franklin 60
bilangan kuantum 139, 141
bilangan kuantum magnetik 143, 148
bilangan kuantum orbital 142, 145, 148
bilangan kuantum spin 144, 148
bilangan kuantum utama 142, 145, 148
binding energy 178
bismut 180

C

cahaya 40, 41, 42, 43, 44, 123
cepat rambat gelombang 3, 6
Charles Augustin Coulomb 60
Christiaan Huygens 155

D

daya 124, 126, 127, 109, 110, 198
De Broglie 135, 153
defek massa 178
demokritus 132
deret aktinium 186
deret Balmer 140
deret Brackett 140
deret cahaya tampak 140
deret inframerah 140
deret Lyman 140
deret neptunium 186
deret Paschen 140
deret Pfund 140
deret radioaktif 186
deret thorium 186
deret ultraviolet 140
deret uranium 186
diafragma 41
dielektrik 68, 70, 76
difraksi 40, 48, 46, 47, 54
digram fasor 101, 102, 103, 104, 106, 110
dilatasi waktu 164, 171
dimensi 34
dinamo 98
dinamo sepeda 96, 98
disintegrasi 180
diskret 135
dispersi 40, 41, 42, 54
disturbansi 6
dosis radiasi 203

E

Edward Morley 155
efek Doppler 31, 33, 36
efek magnetik 80
Efek Zeeman 143
ekolokasi 24
elektrode 133
elektrodinamika 135
elektron 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 142, 143, 144, 145, 146, 148
energi 58, 71, 74
energi ikat inti 178
energi ionisasi 138
energi kalor 100, 101, 111
energi kinetik 197
energi kuantum 126
energi panas 197
energi potensial 75
energi potensial listrik 66, 67, 138
energi relativistik total 169, 172
episentrum 7
Ernest Marsden 134
Ernest Rutherford 134
Ernest Thomas S. Walton 187
eter 155, 156

F

faktor daya 110
fase 103, 104, 107, 108, 110, 111
fluida 23
fluks listrik 64, 65
fluks magnetik 96, 97, 98, 111
fluoresensi 180
fosforesensi 180, 181
foton 137, 138, 139
fragmen fisi 189
frekuensi 3, 13, 14, 16, 21, 22, 27, 29, 31, 32, 33, 44, 54, 97, 102, 108, 126
Fresnell 40
fungsi sinus 97, 99, 111

G

garis gaya listrik 63, 64
garis spektral 143
gaya Coulomb 135, 180, 191
gaya inti 177, 191
gaya listrik 61, 62
gaya Lorentz 80, 86, 87, 88
gaya magnetik 80,87
gelombang 2, 3, 4, 5, 8, 16
gelombang bunyi 20, 23, 24, 26, 31, 34, 36
gelombang datang 8
gelombang elektromagnetik 123, 124, 106, 129, 135, 153
gelombang longitudinal 2, 3, 16, 20, 36
gelombang pantul 8
gelombang sinusoidal 100
gelombang stasioner 8, 9, 10, 11, 16, 27
gelombang transversal 2, 4, 16
generator AC 96, 97, 99
getaran 2, 5, 6, 21, 22
GGL induksi 96, 97, 98, 99, 111

GGL induktansi 102
Gustav Robert Kirchoff 123

H

hambatan 100, 101, 102, 103, 111
Hans Christian Oersted 80
Hans William Geiger 134
harga efektif 100, 101, 111
harga rata-rata 100, 101, 111
Henri Becquerel 153, 177
Hideki Yukawa 177
hidrophone 25
hiposentrum 6
hipotesa Planck 122, 125
holografi 53, 54
hukum Biot-Savart 80, 83
hukum Brewster 51
hukum Coulumb 58, 60, 61, 75
hukum Faraday 97
hukum Gauss 58, 65, 76
hukum gravitasi Newton 62
hukum kekekalan momentum 166
hukum Kirchoff 102, 104
hukum Ohm 104
hukum pergeseran Wien 122, 124
hukum Snellius 42, 51
hukum Stefan-Boltzmann 123, 126, 128, 129
Huygens 40

I

impedansi 106, 108
indek bias 43, 51, 54
induksi 60
induksi elektromagnetik 98, 99
induksi magnetik 80
induktansi 108
induktif 102, 106
induktor 109
inframerah 123, 127
infrasonik 22, 36
intensitas bunyi 34, 35, 36
intensitas radiasi 123, 124, 129
interferensi 8, 40, 44, 45, 54, 156, 157
interferensi bunyi 26
interferensi destruktif 9, 12, 26, 44
interferensi gelombang 12
interferensi konstruktif 9,12, 26, 44
interferometer 155, 156
inti atom 169, 176, 177, 189, 191, 192, 199, 204
inti transmutasi 187
isolator 68, 70
isotop 199, 202, 204

J

jari-jari Bohr 136
John D Cockcroft 187

K

kaidah tangan kanan 80, 82, 84
kalor 110, 122, 123
kapasitansi ekivalen 71, 73
kapasitansi 68, 70, 71, 73
kapasitif 106
kapasitor variabelitor 104, 109
kapasitor 68, 69, 70, 71, 73, 74, 75, 76
katode 133, 148
kerangka acuan inersial 155, 157, 170
kesetimbangan 20
kesetimbangan radiasi 127
kesetimbangan termal 124, 127
koefisien emisivitas 123
konduktor 68, 69, 74, 75
konfigurasi elektron 144, 146, 147
konsentris 34
konstanta Boltzmann 123
konstanta Planck 142
konstanta Rydberg 141
kontinu 135
kontraksi panjang 162, 171
kuanta 125, 126, 129
kuantisasi ruang 143, 144
kuat arus 107, 108
kumparan 85, 87, 88, 96, 97, 98, 99, 102

L

layangan gelombang 13, 14, 16

M

Maglev 80
massa atom 177, 191
massa inti 178
massa neutron 177
massa proton 177
massa relativistik 171
Max Planck 125, 126
Maxwell 40, 153
medan listrik 58, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 133
medan magnetik 80, 82, 83, 84, 85, 87, 88, 98, 99, 109, 133, 143, 144
medan magnetik induksi 81, 82
medium 20, 23, 31, 32, 33, 155
mekanika kuantum 135, 142, 148
Michael Faraday 97
model atom Bohr 132, 135
model atom Rutherford 132, 134, 135
model atom Thomson 132, 133, 134
momen gaya 88
momentum 165
momentum relativistik 165, 172
momentum sudut 142, 143
monokromatik 41
motor listrik 86, 88
muatan listrik 58, 59, 62, 74, 75
muatan negatif 60, 63, 133, 134
muatan positif 60, 63, 66, 75, 134
muatan uji 62, 63, 66, 75

N

nada 28, 29
Neils Bohr 135
neutron 132, 176, 177, 179, 180, 182, 188, 189, 191, 197, 201
Newton 40
nomor atom 142, 146, 176, 177, 181, 182, 199, 204
nomor massa 176, 177, 181, 186, 199, 204
nukleon 176, 177, 178, 188, 189
nukleus 176

O

osilator 107, 126
osiloskop 133

P

panjang gelombang 3, 16, 43, 45, 47, 51, 123, 124, 135, 136, 139, 140, 141
panjang gelombang foton 138
paradoks anak kembar 164
partikel 133, 134
peluruhan 180, 181, 182, 183, 184, 191, 192
pembiasan 42
percobaan Michelson–Morley 155, 156
periode 100
periode gelombang 3
persamaan gelombang berjalan 4, 5
perut gelombang 9, 10
Pieter Zeeman 144
pipa organa terbuka 27, 28
pipa organa tertutup 27, 29
polarisasi 40, 49, 50, 51, 52, 54
polaroid 50
polikromatik 43, 41
postulat Bohr 135, 137, 148
postulat Einstein 157, 158, 160, 162, 163
potensial listrik 58, 66, 67, 76
Power supply 41
prinsip larangan Pauli 144, 145, 146, 148
prisma 41, 42
proton 132, 176, 179, 180, 182, 187, 188, 189, 191
pulsa transversal 6

R

radiasi 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 199, 200, 201, 202, 203
radiasi termal 123
radioaktif 180, 181, 183, 184, 185, 186, 187, 191, 192, 196, 199, 201, 202
radioaktivitas 153, 169, 180, 181, 185, 186, 187,196
radioisotop 196, 199, 200, 202, 203
rangkaian induktif 102, 103, 111
rangkaian induktor 109
rangkaian kapasitif 104, 112
rangkaian kapasitor murni 104
rangkaian paralel 71
rangkaian resistif 102, 111
rangkaian seri 73
rangkaian seri RLC 105, 106
Ray box 41
Rayleigh dan Jeans 124, 125
reaksi fisi 189, 192, 196, 197
reaksi fusi 189, 190, 192, 196
reaksi inti 187, 188, 192, 196
reaktansi induktif 103, 108, 112
reaktansi kapasitif 104, 108, 112
reaktor 190, 192
reaktor daya 197, 198
reaktor nuklir 196, 197, 204
relativistik 165, 188
relativitas Einstein 153
relativitas Newton 153, 158
resistor 110
resonansi 27, 28, 106, 108, 110, 112
resultan vektor 62
rumus Rayleigh-Jeans 124
Rutherford 187

S

simbol atom 177
simpul gelombang 9, 10
sinar beta 180, 181, 182, 191
sinar alfa 180, 181, 182, 191
sinar gamma 180, 181, 183, 189, 191, 192, 201, 202
sinar katode 133, 147
sinar–X 201, 203
Sir Joseph John Thomson 133
slinky 2, 3
solenoide 85
sonar 24, 25
spektograf massa 177
spektrum atom hidrogen 132, 135, 139, 141
spektrum kontinu 123
spektrum radiasi benda hitam 124
stabilitas inti 179
sudut deviasi 42, 43
sudut deviasi minimum 42
sudut dispersi 43
sudut fase 102
suhu 122, 123, 124, 126, 127, 128, 129

T

taraf intensitas bunyi 35, 36
tegangan sinusoidal 99, 100, 111
teksitasi 138, 139
teori atom 132
teori atom Bohr 142, 148
teori eter 155, 157
teori meson gaya nuklir 177
teori Newton 152
teori Planck 125
teori relativitas 152, 168
teori relativitas khusus 157
teori Yukawa 177
Thomas Young 40, 44
transformasi Galileo 157, 170
transformasi Lorentz 158, 159, 160, 162, 163, 165, 171
transformator 98, 99, 111
transisi elektron 138

U

ultrasonik 22, 25, 26
usaha 66, 67

V

vektor 82, 143
voltmeter 101

W

waktu paruh 184, 186, 192
Wilhelm Wien 124

Kunci Jawaban Soal Terpilih

Soal-soal Uji Kompetensi Bab 1

A. Pilihan Ganda

1. a 7. a
3. d 9. e
5. a

B. Uraian

1. $y = 0$
3. a. 20 m/s
   b. $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ kg/m
5. $5\sqrt{2}$ cm

Soal-soal Uji Kompetensi Bab 2

A. Pilihan Ganda

2. c 8. b
4. b 10. d
6. e

B. Uraian

2. 36 cm dan 60 cm
4. 70 dB

Soal-soal Uji Kompetensi Bab 3

A. Pilihan Ganda

1. c 7. d
3. b 9. a
5. c

B. Uraian

1. 0,2 °
3. 3 cm
5. $\Delta s = d \sin \theta$

   $n\pi = d \sin \theta$

   $d = \frac{\sin \theta}{n \cdot \pi}$ dengan mengetahui sudut difraksi dan panjang gelombang sinar-X, serta orde difraksi maka d dapat dihitung.

Soal-soal Uji Kompetensi Bab 4

A. Pilihan Ganda

2. e 8. c
4. c 10. b
6. b

B. Uraian

2. $1{,}02 \cdot 10^{-10}$ F = 10^2 pF
4. a. 0
   b. $6{,}25 \cdot 10^7$ N/C

Soal-soal Akhir Semester 1

A. Pilihan Ganda

1. a 9. a 17. d 25. d
3. c 11. b 19. a
5. c 13. c 21. b
7. a 15. d 23. c

B. Uraian

1. a. λ = 17,14 cm
   b. x = 34,28 cm
3. f_p = 984,6 Hz
5. p = 424,45 W
7. $y = 0{,}01 \sin 2\pi(4t - 16x)$
9. T = 0,226 N

Soal-soal Uji Kompetensi Bab 5

A. Pilihan Ganda

1. c 7. b
3. a 9. a
5. b

B. Uraian

1. $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi d}$

   $F = B\, i\, \ell$

   $\frac{F}{\ell} = B \cdot i$

   $\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 i}{2\pi d}$
3. $2 \cdot 10^{-1}$ m
5. 30 °

Soal-soal Uji Kompetensi Bab 6

A. Pilihan Ganda

2. c 8. c
4. d 10. c
6. d

B. Uraian

2. a. $\frac{250}{\pi}$ volt
   b. $125\sqrt{2}$ V
   c. 50 Hz
4. a. 100 Ω
   b. 10^5 W

Soal-soal Uji Kompetensi Bab 7

A. Pilihan Ganda

1. a 5. e
3. d 7. e

B. Uraian

1. $1{,}42 \cdot 10^6$ W/m2
3. a. $1{,}79 \cdot 10^4$ W/m2
   b. $3{,}84 \cdot 10^{-6}$ m
5. 0,12

Soal-soal Uji Kompetensi Bab 8

A. Pilihan Ganda

2. b 8. a
4. d 10. b
6. a

B. Uraian

2. $9{,}12 \cdot 10^6$ m dan $3{,}64 \cdot 10^7$ m
4. - Thomson:
   Atom merupakan muatan positif yang padanya terdapat elektron dengan pola mirip roti kismis.
   - Rutherford:
   Atom terdiri atas inti bermuatan positif yang dikelilingi oleh elektron yang mengorbitnya.
   - Bohr:
     - Elektron dalam mengelilingi inti memiliki tingkat energi tertentu.
     - Elektron dari suatu orbit dapat berpindah ke orbit lain dengan menyerap atom melepas foton.

Soal-soal Uji Kompetensi Bab 9

A. Pilihan Ganda

1. c 7. a
3. a 9. d
5. a

B. Uraian

1. a. $t = 2{,}58$
   b. $x = 50$ m
   $y = 2{,}5$ m
3. 0,91 c
5. 2,4 m

Soal-soal Uji Kompetensi Bab 10

A. Pilihan Ganda

2. a 8. b
4. a 10. a
6. b

B. Uraian

2. ${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}A \rightarrow {}^{A-8}_{Z-4}B \rightarrow {}^{A-8}_{Z-3}C \rightarrow {}^{A-8}_{Z-4}D$
4. a. 1.558,27 MeV dan $27{,}705 \cdot 10^{-27}$ kg

Soal-soal Uji Kompetensi Bab 11

A. Pilihan Ganda

1. d 7. a
3. a 9. b
5. c

B. Uraian

1. Komponen utama reaktor nuklir
   a. Perisai radiasi berfungsi untuk mencegah kebocoran sinar-sinar radioaktif yang berbahaya bagi kehidupan.
   b. Moderator berfungsi untuk mengurangi energi kinetik neutron.
   c. Bahan bakar merupakan sumber energi reaktor.
   d. Batang kendali berfungsi sebagai penyerap neutron untuk mengendalikan reaksi fisi.
3. Radioisotop adalah isotop yang memancarkan radioaktif. Penerapan dalam bidang pertanian adalah sebagai *tracer,* untuk menghasilkan bibit unggul dengan iradiasi, dan mengendalikan hama serangga
5. Jawaban ada pada tabel 11.1 halaman 203

Soal-soal Akhir Semester 2

A. Pilihan Ganda

2. d 8. a 14. c 20. d
4. e 10. b 16. c 22. d
6. d 12. e 18. c 24. a

B. Uraian

2. a. $I = 5.445{,}47$ W/m^2
   b. $\lambda_{max} = 4{,}11 \cdot 10^{-6}$ M
4. $\Delta m = 18{,}85 \cdot 10^6$ kg/s
6. $v = 2{,}308 \cdot 10^5$ m/s dan $T = 6{,}78 \cdot 10^4$ s
8. a. $\lambda_2 = 1{,}053 \cdot 10^{-7}$ m
   b. $\lambda_2 = 4{,}854 \cdot 10^{-7}$ m
   c. $\lambda_2 = 1{,}28 \cdot 10^{-6}$ m
   d. $\lambda_2 = 2{,}63 \cdot 10^{-6}$ m
   e. $\lambda_2 = 4{,}65 \cdot 10^{-6}$ m
10. a. Bidang pertanian
    - menganalis proses fotosintesis
    - menghasilkan bibit unggul
    - mengawetkan produk pertanian

    b. Bidang kedokteran
    - mendeteksi kelainan fungsi organ
    - pengobatan berbagai penyakit

    c. Bidang kepurbakalaan
    - menentukan umur fosil

Daftar Pustaka

Alonso, M. dan Finn, E.D. 1980. *Fundamental University Physics*. New York: Addison–Wesley Longman.

Beiser, Arthur. 1999. *Konsep Fisika Modern (terjemahan)*. Jakarta: Erlangga.

Budikase, E, dkk, 1987. *Fisika Untuk SMU*. Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.

Bueche, Fredrick, J. 1999. *Fisika*. Jakarta: Erlangga

Haliday, David dan Resnick, Robert. 1990. *Fisika (terjemahan)*. Jakarta: Erlangga.

Haliday, David dan Resnick, Robert. 1990. *Fisika Modern (terjemahan)*. Jakarta: Erlangga.

http: //en.wikipedia.org/wiki

http: //www.chem-is-try.org/?sect=artikel&ext=35

http: //www.infonuklir.com/tips/tipskes.htm

http: //zaki.web.ugm.ac.id/web

Ik Gie, Tan dkk. 1999. *Fisika Modern*, Jakarta: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan.

Krane, Kenneth, S. 1992. *Fisika Modern (terjemahan)*. Jakarta: Penerbit Universitas Indonesia.

Sears, Francis, W. 1984. *Fisika Untuk Universitas (terjemahan)*. Bandung: Bina Cipta.

Suratman, 2001. *Introduksi Proteksi Radiasi Bagi Siswa/Mahasiswa Praktek*. Yogyakarta: Litbang Maju Batan.

Surya, Yohanes. 1996. *Olimpiade Fisika*. Jakarta: Primatika Cipta Ilmu.

Sutrisno. 1986. *Elektronika II*. Jakarta: Karunika.

Tipler, Paul, A. 2001. *Fisika Untuk Sains dan Teknik (terjemahan)*, Jakarta: Erlangga.

Woodford, Chris. 2006. *Seri Kegiatan Sains: Bunyi dan Pendengaran (terjemahan)*, Bandung: Pakar Raya.

_____. 2000. *Panduan Percobaan Fisika*. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional.

Diunduh dari BSE.Mahoni.com

ISBN 978-979-068-223-7 (no.jld.lengkap)
ISBN 978-97--068-236-8

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 34 Tahun 2008 tanggal 10 Juli 2008 tentang Penetapan Buku Teks yang Memenuhi Syarat Kelayakan untuk Digunakan dalam proses pembelajaran.

Harga Eceran Tertinggi (HET) Rp. 14.401,-