

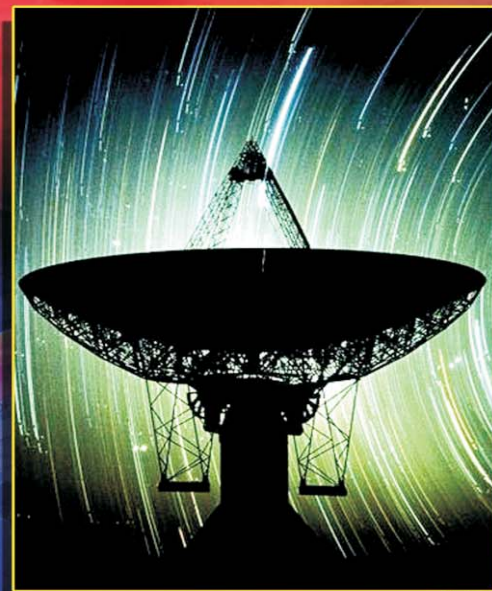
● Sri Handayani

● Ari Damari



# FISIKA

Untuk SMA dan MA Kelas XII



PUSAT PERBUKUAN  
Departemen Pendidikan Nasional

3

# FISIKA

Untuk SMA dan MA Kelas XII

**Penulis :**

Sri Handayani  
Ari Damari



PUSAT PERBUKUAN  
Departemen Pendidikan Nasional

3

Hak Cipta pada Departemen Pendidikan Nasional  
Dilindungi Undang-undang  
Hak cipta buku ini dibeli oleh Departemen Pendidikan Nasional  
dari Penerbit CV. Adi Perkasa

# FISIKA

**Untuk SMA dan MA Kelas XII**

Ukuran Buku : 17,6 X 25 cm  
Font : Times New Roman, Albertus Extra Bold  
Penulis : Sri Handayani  
Ari Damari  
Design Cover : Samsocl  
Editor : Sri Handayani, Ari Damari  
Ilustrasi : Joemady, Sekar  
Setting : Dewi, Wahyu, Watik, Eni, Novi  
Lay Out : Wardoyo, Anton

530.07

SRI SRI Handayani

f Fisika 3 : Untuk SMA/MA Kelas XII / penulis, Sri Handayani, Ari Damari ;  
editor, Sri Handayani, Ari Damari ; ilustrasi, Joemady, Sekar. -- Jakarta :  
Pusat Perbukuan, Departemen Pendidikan Nasional, 2009.  
vi, 154 hlm. : ilus. ; 25 cm.

Bibliografi : hlm. 152

Indeks

ISBN 978-979-068-166-8 (No. Jilid Lengkap)

ISBN 978-979-068-173-6

1.Fisika-Studi dan Pengajaran I. Judul II. Sri Handayani. III. Ari Damari  
IV. Joemady V. Sekar

Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan  
Departemen Pendidikan Nasional  
Tahun 2009  
Diperbanyak oleh ...

# KATA SAMBUTAN

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Departemen Pendidikan Nasional, pada tahun 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 27 Tahun 2007 tanggal 25 Juli 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

**Buku Fisika SMA XII** ini merupakan buku yang dapat digunakan sebagai buku ajar mata pelajaran Fisika untuk siswa di Sekolah Menengah Atas (SMA) dan Madrasah Aliyah (MA). Buku ini memenuhi kebutuhan pembelajaran Fisika yang membangun siswa agar memiliki sikap ilmiah, objektif, jujur, berfikir kritis, bisa bekerjasama maupun bekerja mandiri sesuai dengan tuntutan kurikulum tersebut.

Untuk memenuhi tujuan di atas maka setiap bab buku ini disajikan dalam beberapa poin yaitu : **penjelasan materi** yang disesuaikan dengan pola berfikir siswa yaitu mudah diterima, **contoh soal dan penyelesaian** untuk mendukung pemahaman materi dengan disertai soal yang dapat dicoba, **latihan** disetiap sub-bab untuk menguji kompetensi yang telah dikuasai, **penting** yang berisi konsep-konsep tambahan yang perlu diingat, **rangkuman** untuk kilas balik materi penting yang perlu dikuasai, dan **evaluasi bab** disajikan sebagai evaluasi akhir dalam satu bab dengan memuat beberapa kompetensi dasar.

Penyusun menyadari bahwa buku ini masih ada kekurangan dalam penyusunannya, namun penyusun berharap buku ini dapat bermanfaat bagi bapak/ ibu guru dan siswa dalam proses belajar mengajar. Kritik dan saran dari semua pengguna buku ini sangat diharapkan. Semoga keberhasilan selalu berpihak pada kita semua.

Penyusun

# DAFTAR ISI

<b>KATA SAMBUTAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>v</b>
<b>BAB 1 GEJALA GELOMBANG .....</b>	<b>1</b>
A. Pengertian Gelombang .....	2
B. Gelombang Berjalan .....	5
C. Gelombang Stasioner .....	9
D. Sifat-Sifat Gelombang .....	14
Rangkuman Bab 1 .....	15
Evaluasi Bab 1 .....	16
<b>BAB 2 BUNYI .....</b>	<b>17</b>
A. Pendahuluan .....	18
B. Tinggi Nada dan Pola Gelombang .....	19
C. Intensitas dan Taraf Intensitas .....	24
D. Efek Doppler dan Pelayangan .....	28
Rangkuman Bab 2 .....	32
Evaluasi Bab 2 .....	33
<b>BAB 3 CAHAYA .....</b>	<b>35</b>
A. Interferensi Cahaya .....	36
B. Difraksi Cahaya .....	41
C. Polarisasi Cahaya .....	45
Rangkuman Bab 3 .....	48
Evaluasi Bab 3 .....	49
<b>BAB 4 LISTRIK STATIS .....</b>	<b>51</b>
A. Hukum Coulomb .....	52
B. Potensial dan Energi Potensial Listrik .....	59
C. Hukum Gauss .....	62
D. Kapasitor .....	68
Rangkuman Bab 4 .....	73
Evaluasi Bab 4 .....	74

<b>BAB 5</b>	<b>INDUKSI MAGNET .....</b>	<b>77</b>
	A. Medan Magnet oleh Kawat Arus .....	78
	B. Gaya Lorentz .....	82
	Rangkuman Bab 5 .....	87
	Evaluasi Bab 5 .....	88
<b>BAB 6</b>	<b>IMBAS ELEKTROMAGNETIK .....</b>	<b>91</b>
	A. Hukum Faraday .....	92
	B. Induksi Diri .....	98
	C. Rangkaian Arus Bolak Balik .....	102
	Rangkuman Bab 6 .....	108
	Evaluasi Bab 6 .....	109
<b>BAB 7</b>	<b>RADIASI BENDA HITAM .....</b>	<b>111</b>
	A. Radiasi Kalor .....	112
	B. Teori Kuantum Planck .....	114
	Rangkuman Bab 7 .....	117
	Evaluasi Bab 7 .....	117
<b>BAB 8</b>	<b>FISIKA ATOM .....</b>	<b>119</b>
	A. Perkembangan Teori Atom .....	120
	B. Atom Berelektron banyak .....	126
	Rangkuman Bab 8 .....	128
	Evaluasi Bab 8 .....	129
<b>BAB 9</b>	<b>RELATIVITAS .....</b>	<b>131</b>
	A. Pendahuluan .....	132
	B. Relativitas Einstein .....	134
	Rangkuman Bab 9 .....	139
	Evaluasi Bab 9 .....	140
<b>BAB 10</b>	<b>FISIKA INTI .....</b>	<b>141</b>
	A. Gaya Ikat Inti, Energi Ikat Inti dan Defek Massa.....	142
	B. Radioaktivitas .....	144
	C. Reaksi Inti .....	146
	Rangkuman Bab 10 .....	148
	Evaluasi Bab 10 .....	149
	<b>GLOSARIUM .....</b>	<b>150</b>
	<b>KETETAPAN FISIKA .....</b>	<b>151</b>
	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>152</b>
	<b>INDEKS .....</b>	<b>154</b>

## B A B

# 1

# GEJALA GELOMBANG



Sumber: [www.alam-leoniko.or.id](http://www.alam-leoniko.or.id)

Jika kalian pergi ke pantai maka akan melihat ombak air laut. Ombak itu berupa puncak dan lembah dari getaran air laut yang berjalan. Kejadian itulah yang disebut gelombang. Contohnya lain dapat dilihat pada gambar di atas. Pada gambar tersebut menunjukkan gelombang tsunami yang terlihat memiliki kekuatan yang dahsyat. Apa sebenarnya gelombang itu, besaran-besaran apa yang dimiliki? Dan apakah pemanfaatannya?

Pertanyaan-pertanyaan di atas dapat kalian pelajari pada bab ini. Oleh sebab itu setelah belajar bab ini diharapkan kalian dapat :

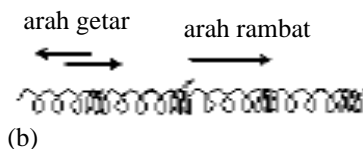
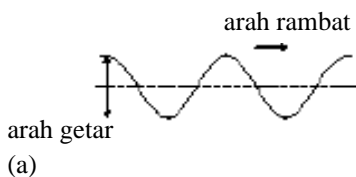
1. menjelaskan pengertian gelombang dan besaran-besaran yang dimiliki,
2. menentukan besaran-besaran pada gelombang berjalan,
3. menentukan superposisi gelombang berjalan menjadi gelombang stasioner,
4. menerapkan hukum melde pada gelombang oada dawai.



## A. Pengertian Gelombang



**Gambar 1.1.**  
Gelombang air



**Gambar 1.2.**  
(a) gelombang transversal  
(b) gelombang longitudinal

### 1. Terbentuknya gelombang

Coba kalian buat getaran dan letakkan getaran itu pada air. Apa yang terjadi? Gejalanya dapat kalian lihat pada *Gambar 1.1*. Pada air itu akan terjadi gelombang. Jadi sebuah gelombang akan terjadi bila ada sumber yang berupa getaran dan ada yang merambatkannya.

Pada gelombang tersebut terjadi perambatan energi getaran.

### 2. Jenis-jenis gelombang

Di alam ini banyak sekali terjadi gelombang. Contohnya ada gelombang air, gelombang tali, cahaya, bunyi, dan gelombang radio. Apakah semua gelombang itu sama? Ternyata semua gelombang itu dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis sesuai sifat kemiripannya contohnya dapat dibagi dengan dasar berikut.

#### a. Berdasarkan arah rambat dan arah getar

Berdasarkan arah rambat dan arah getarnya, gelombang dapat dibagi menjadi dua. Pertama, *gelombang transversal* yaitu gelombang yang arah rambat tegak lurus pada arah getarnya. Contohnya gelombang air, tali dan cahaya.

Kedua, *gelombang longitudinal* yaitu gelombang yang arah rambat dan arah getarnya sejajar. Contohnya gelombang pegas dan bunyi. Perbedaan kedua gelombang ini dapat kalian lihat pada *Gambar 1.2*.

#### b. Berdasarkan mediumnya

Berdasarkan mediumnya, gelombang juga dapat dibagi menjadi dua. *Gelombang mekanik* yaitu gelombang yang membutuhkan media dalam merambat. Contohnya gelombang tali dan bunyi. Apa yang terjadi jika ada dua orang astronot yang bercakap-cakap diruang hampa? Jawabnya tentu tidak bisa secara langsung dari percakapan antar bunyi dari mulutnya.

Sedangkan adalagi gelombang yang tidak membutuhkan media dalam merambat. Gelombang ini dinamakan *gelombang elektromagnetik*. Contohnya cahaya, gelombang radio dan sinar-X.

#### c. Berdasarkan amplitudonya

Berdasarkan amplitudonya, ternyata ada dua jenis juga. Ada gelombang yang amplitudonya tetap yaitu *gelombang berjalan*. Dan ada gelombang yang amplitudonya berubah sesuai posisinya yaitu *gelombang stasioner*. Dua jenis gelombang ini dapat kalian pahami pada sub bab berikutnya.

### 3. Besaran-besaran pada gelombang

Di kelas XI kalian telah belajar tentang getaran, masih ingat besaran-besaran yang dimiliki? Gelombang sebagai rambatan energi getaran memiliki besaran-besaran yang sama dan ada beberapa tambahan. Diantaranya adalah frekuensi dan periode.

Frekuensi gelombang adalah banyaknya gelombang yang terjadi tiap detik. Sedangkan periode adalah waktu yang dibutuhkan untuk satu gelombang.

$$\text{a. } f = \frac{N}{t}$$

$$\text{b. } T = \frac{t}{N}$$

$$\text{c. } f = \frac{1}{T}$$

.....(1.1)

dengan  $f$  = frekuensi (Hz)

$T$  = periode (s)

$N$  = banyaknya gelombang

$t$  = waktu (s)

Untuk gelombang transversal satu gelombang sama dengan dari puncak ke puncak terdekat atau dari lembah ke lembah terdekat. Sedangkan untuk gelombang longitudinal satu gelombang sama dengan dari regangan ke regangan terdekat atau dari rapatan ke rapatan terdekat.

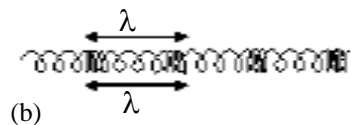
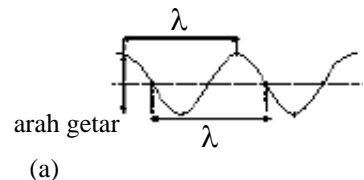
Berikutnya adalah besaran cepat rambat. Gelombang merupakan bentuk rambatan berarti memiliki kecepatan rambat. Sesuai dengan pengertian dasarnya maka cepat rambat ini dapat dirumuskan seperti berikut.

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

Untuk satu gelombang dapat di tentukan besaran berikutnya yang perlu diketahui adalah panjang gelombang dan cepat rambat gelombang. Perhatikan *Gambar 1.3*. Panjang gelombang yang disimbulkan  $\lambda$  merupakan *panjang satu gelombang atau jarak yang ditempuh untuk satu kali gelombang*.

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

atau  $v = \lambda \cdot f$  .....(1.2)



**Gambar 1.3**

Panjang 1 gelombang pada :

(a) gelombang transversal dan

(b) gelombang longitudinal

**CONTOH 1.1**

Sebuah gelombang menjalar pada air. Dalam waktu 2 s gelombang dapat menempuh jarak 10 m. Pada jarak tersebut terdapat 4 gelombang. Tentukan frekuensi, periode, panjang gelombang, dan cepat rambat gelombang!

**Penyelesaian**

$$t = 2 \text{ s}, S = 10 \text{ m}, N = 4$$

- a. frekuensi gelombang :

$$f = \frac{N}{t} = \frac{4}{2} = 2 \text{ Hz}$$

- b. periodenya setara :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2} \text{ s}$$

- c. panjang gelombang memenuhi :

$$\lambda = \frac{S}{N} = \frac{10}{4} = 2,5 \text{ m}$$

- d. cepat rambat gelombang :

$$v = \lambda f \\ = 2,5 \cdot 2 = 5 \text{ m/s}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Gelombang dirambatkan dengan frekuensi 5 Hz. Gelombang tersebut menempuh jarak 15 m dalam waktu 5 s. Tentukan :

- periode gelombang,
- panjang gelombang,
- cepat rambat gelombang.

**LATIHAN 1.1**

- Gelombang air laut menyebabkan permukaan air naik turun dengan periode 2 detik. Jika jarak antara dua puncak gelombang 5 meter maka gelombang akan mencapai jarak 10 meter dalam waktu  $t$ . Berapakah  $t$  ?
- Pada permukaan suatu danau terdapat dua buah gabus yang terpisah satu dari lainnya sejauh 60 cm. Keduanya turun naik bersama permukaan air dengan frekuensi 2 getaran per detik. Bila salah satu gabus berada di puncak bukit gelombang, yang lainnya berada di lembah gelombang; sedangkan diantara kedua gabus itu terdapat satu bukit gelombang. Tentukan cepat rambat gelombang pada permukaan danau !
- Sebuah gelombang transversal mempunyai periode 4 detik. Jika jarak antara dua buah titik berurutan yang membentuk satu gelombang sebesar 8 cm, maka berapakah cepat rambat gelombang ?

## B. Gelombang Berjalan

Semua gelombang akan merambat dari sumber ke tujuannya. Gelombang inilah yang dinamakan gelombang berjalan. Pada gelombang berjalan ini perlu dipelajari simpangan dan fasenya. Perhatikan pada penjelasan berikut.

### 1. Simpangan getar gelombang

Gelombang berjalan memiliki sifat pada setiap titik yang dilalui akan memiliki amplitudo yang sama. Perhatikan gelombang berjalan dari sumber O ke titik p yang berjarak  $x$  pada *Gambar 1.4*. Bagaimana menentukan simpangan pada titik p? Simpangan tersebut dapat ditentukan dari simpangan getarannya dengan menggunakan waktu perjalanannya. Jika O bergetar  $t$  detik berarti titik p telah bergetar  $t_p$  detik dengan hubungan :

$$t_p = t - \frac{x}{v}$$

Dan simpangan di titik p memenuhi

$$\begin{aligned} y_p &= A \sin (\omega t_p) \\ &= A \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) \\ &= A \sin \left( \omega t - \frac{v\omega x}{v} \right) \end{aligned}$$

$$y_p = A \sin (\omega t - kx) \quad \dots\dots\dots(1.3)$$

dengan :  $y_p$  = simpangan di titik p (m)  
 $A$  = amplitudo gelombang (m)  
 $\omega$  = frekuensi sudut  
 $k$  = bilangan gelombang  
 $x$  = jarak titik ke sumber (m)  
 $t$  = waktu gelombang (s)

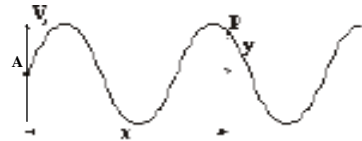
Nilai  $\omega$  dan  $k$  juga memenuhi persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \\ \text{dan } k &= \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{v} \end{aligned}$$

Dengan substitusi persamaan di atas pada persamaan 1.3 dapat diperoleh bentuk lain simpangan getaran.

$$y_p = A \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad \dots\dots\dots(1.4)$$

sumber gelombang



**Gambar 1.4**  
Gelombang berjalan.

### Penting

Persamaan 1.3 dan 1.4 berlaku jika getaran sumber bergerak ke atas dulu dari titik  $y = 0$  (untuk  $t = 0$ ). Jika ke bawah dulu maka  $y$  bernilai negatif (-). Nilai negatif pada (-)  $kx$  berarti gelombang menjauhi sumber, jika kebolehanannya aku bernilai positif.

Perhatikan syarat berlakunya persamaan 1.3 dan 1.4 pada penjelasan penting di samping. Coba kalian cermati. Dengan syarat-syarat yang ada maka akan berlaku persamaan berikut.

$$y = \pm A \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda} \right) \dots\dots\dots (1.5)$$

### CONTOH 1.2

Gelombang merambat dari sumber O melalui titik p. Simpangan getar gelombang dititik p memenuhi :  $y = 0,02 \sin 10\pi (2t - \frac{x}{20})$ . Semua besaran dalam satuan SI. Tentukan :

- amplitudo gelombang
- periode gelombang
- frekuensi gelombang
- panjang gelombang
- cepat rambat gelombang

#### Penyelesaian

$$y = 0,02 \sin 10\pi (2t - \frac{x}{20})$$

$$= 0,02 \sin 2\pi (10t - \frac{x}{4})$$

Bentuk umum persamaan 1.5

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

Jadi dapat diperoleh :

- amplitudo :  $A = 0,02 \text{ m}$
- periode :  $T = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ s}$
- frekuensi :  $f = \frac{1}{T} = 10 \text{ Hz}$
- panjang gelombang :  $\lambda = 4 \text{ m}$
- cepat rambat gelombang:  
 $v = \lambda \cdot f$   
 $= 4 \cdot 10 = 40 \text{ m/s.}$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

persamaan :  $y = 10^{-2} \sin 4\pi \left( \frac{x}{10} - \frac{t}{10} \right)$

Semua memiliki satuan SI. Tentukan : amplitudo, periode, frekuensi, panjang gelombang dan cepat rambat gelombang.

## 2. Fase dan sudut fase gelombang

Besaran yang juga penting untuk dipelajari adalah *fase gelombang*. Fase gelombang dapat didefinisikan sebagai bagian atau tahapan gelombang. Perhatikan persamaan 1.5. Dari persamaan itu fase gelombang dapat diperoleh dengan hubungan seperti berikut.

$$\phi = \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \dots\dots\dots (1.6)$$

dengan :  $\phi$  = fase gelombang

$T$  = periode gelombang (s)

$\lambda$  = panjang gelombang (m)

$t$  = waktu perjalanan gelombang (s)

$x$  = jarak titik dari sumber (m)

Dari fase gelombang dapat dihitung juga sudut fase yaitu memenuhi persamaan berikut.

$$\theta = 2\pi\phi \text{ (rad)} \dots\dots\dots (1.7)$$

Dari persamaan 1.6 dan 1.7 dapat diperoleh perumusan beda fase dan beda sudut fase seperti persamaan berikut.

Pada dua titik dengan pengamatan yang bersamaan:

$$\ddot{A}_\phi = \frac{\ddot{A}}{T}$$

Pada satu titik yang dilihat pada waktu yang berlainan:

$$\ddot{A}_\phi = \frac{\ddot{A}_x}{T}$$

Dan beda sudut fase memenuhi:

$$\ddot{A}_\theta = 2\pi \ddot{A}_\phi$$

### Penting

Dua gelombang dapat memiliki fase yang sama dan dinormal-kan sefase. Dua gelombang akan sefase bila beda fasenya memenuhi:

$$\ddot{A}_\phi = 0, 1, 2, 3, \dots$$

atau

$$\theta = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$$

Berarti dua gelombang yang berlawanan fase apabila berbeda fase :

$$\ddot{A}_\phi = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$$

atau

$$\theta = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$$

### CONTOH 1.3

1. Gelombang berjalan sinusoidalnya memenuhi:

$$y = 0,04 \sin 20\pi \left( t - \frac{x}{10} \right).$$

Semua besaran memiliki satuan dalam SI. Tentukan fase dan sudut fase pada titik berjarak 2 m dan saat bergerak 1/2 s!

#### Penyelesaian

$$t = \frac{1}{2} \text{ s}; \quad x = 2 \text{ m}$$

sudut fase gelombang memenuhi:

$$\theta = 20\pi \left( t - \frac{x}{10} \right)$$

$$= 20\pi \left( \frac{1}{2} - \frac{2}{10} \right) = 6\pi \text{ rad}$$

fasenya sebesar :

$$\varphi = \frac{\theta}{2\pi} = \frac{6\pi}{2\pi} = 3.$$

2. Gelombang merambat dari titik P ke titik Q dengan frekuensi 2 Hz. Jarak PQ = 120 cm. Jika cepat rambat gelombang 1,5 m/s maka tentukan beda fase gelombang di titik P dan Q !

**Penyelesaian**

$$f = 2 \text{ Hz}$$

$$v = 1,5 \text{ m/s}$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1,5}{2} = \frac{3}{4} \text{ m}$$

$$x = 120 \text{ cm} = 1,2 \text{ m}$$

Beda fase gelombang memenuhi :

$$\Delta\varphi = \varphi_P - \varphi_Q$$

$$= \left( \frac{t}{T} - \frac{x_P}{\lambda} \right) - \left( \frac{t}{T} - \frac{x_Q}{\lambda} \right)$$

$$= \frac{x_Q - x_P}{\lambda} = \frac{1,2}{3/4} = 0,16.$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Suatu gelombang merambat sepanjang sumbu X dengan amplitudo 2 cm, cepat rambat 50 cm/s dan frekuensi 20 Hz. Dua buah titik pada sumbu X berjarak 4 cm, berapa beda sudut fasenya ?

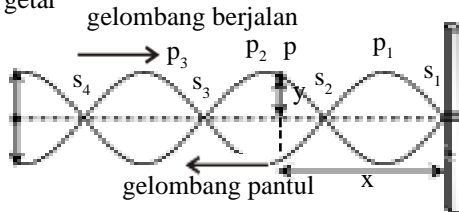


## LATIHAN 1.2

- Dua sumber bunyi A dan B berjarak 7 m. Kedua sumber bunyi sefase dengan frekuensi sama yaitu 179 Hz. Kecepatan bunyi di udara 346 m/s. Titik C terletak pada garis hubung A dan B, pada jarak 4 m dari A. Tentukan beda fase dua gelombang tersebut !
- Sebuah gelombang berjalan dengan persamaan :  $y = 0,02 \sin \pi (50t + x) \text{ m}$ . Dari persamaan gelombang tersebut, tentukan :
  - frekuensi gelombang ,
  - panjang gelombang,
  - cepat rambat gelombang,
  - fase dua titik yang berjarak 50 m !
- Sebuah gelombang merambat dari sumber S ke kanan dengan laju 8 m/s, frekuensi 16 Hz, amplitudo 4 cm. Gelombang itu melalui titik P yang berjarak  $9\frac{1}{2}$  m dari S. Jika S telah bergetar  $1\frac{1}{2}$  detik, dan arah gerak pertamanya ke atas, maka berapakah simpangan titik P pada saat itu ?



**1.**



### Gambar 1.6

Ge

$y_1$

Sec

$y_2$

$y_p$

$$=$$



$$\begin{aligned}
 &= 2A \cos \frac{1}{2} (\omega t - kl + kx + \omega t - kl + kx) \cdot \\
 &\quad \sin \frac{1}{2} (\omega t - kl + kx - \omega t + kl + kx) \\
 &= 2A \cos \frac{1}{2} (2\omega t - 2kl) \cdot \sin \frac{1}{2} (2kx)
 \end{aligned}$$

$$y_p = 2A \sin kx \cos (\omega t - kl) \quad \dots\dots\dots (1.8)$$

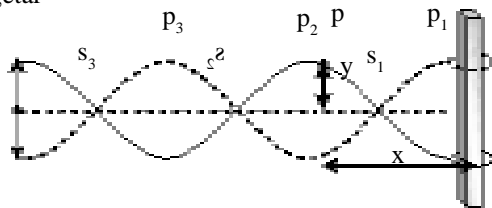
Persamaan 1.8 terlihat bahwa gelombang stationer ujung terikat memiliki amplitudo yang tergabung pada posisinya yaitu memenuhi persamaan berikut.

$$A_p = 2A \sin kx \quad \dots\dots\dots (1.9)$$

## 2. Ujung bebas

Gelombang stationer ujung bebas dapat digambarkan seperti pada *Gambar 1.7*.

sumber getar



**Gambar 1.7**

Gelombang stationer ujung bebas

Gelombang stationer ujung bebas juga terbentuk dari dua gelombang berjalan yaitu gelombang datang dan gelombang pantul.

Gelombang datang :  $y_1 = A \sin (\omega t - k(l-x))$

Gelombang pantul :  $y_2 = A \sin (\omega t - k(l+x))$

Perpaduannya dapat menggunakan analisa matematis yang sesuai dengan gelombang stationer ujung terikat. Coba kalian buktikan sehingga menghasilkan persamaan berikut.

$$y_p = 2A \cos kx \sin (\omega t - 2kl) ; \text{ dan}$$

$$A_p = 2A \cos kx \quad \dots\dots\dots (1.10)$$

## Jarak perut dan simpul

Pada gelombang stationer terjadi perut dan simpul, perhatikan *Gambar 1.6* dan *1.7*. Jika ingin mengetahui jarak dua titik maka dapat menggunakan sifat bahwa jarak perut dan simpul berdekatan sama dengan  $\frac{1}{4} \lambda$ .

$$x_{ps} = \frac{1}{4} \ddot{x} \quad \dots\dots\dots (1.11)$$

### CONTOH 1.4

Tali sepanjang 2 m dilihat pada salah satu ujungnya dan ujung lain digetarkan sehingga terbentuk gelombang stationer. Frekuensi getaran 10 Hz dan cepat rambat gelombang 2,5 m/s. Tentukan jarak titik simpul ke-4 dari (a) titik pantul dan (b) titik asal getaran!

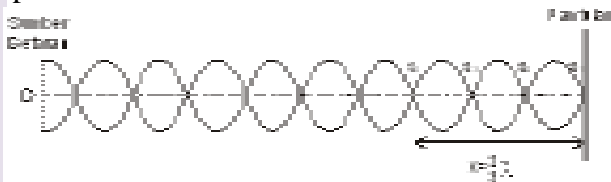
#### Penyelesaian

$$\ell = 2 \text{ m}$$

$$f = 10 \text{ Hz}$$

$$v = 2,5 \text{ m/s} \longrightarrow \ddot{x} = \frac{v}{f} = \frac{2,5}{10} = 0,25 \text{ m}$$

Perhatikan gambar gelombang stationer yang terjadi seperti *Gambar 1.8*.



← Gambar 1.8

- (a) Simpul ke 4 berjarak  $x$  dari pantulan dan besarnya memenuhi :

$$x = \frac{3}{2} \ddot{x} = \frac{3}{2} 0,25 = 0,375 \text{ m}$$

- (b) Jarak simpul ke 4 dari sumber gelombang memenuhi:

$$(\ell - x) = 2 - 0,375 = 1,624 \text{ m}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Dengan soal yang sama pada contoh di atas, tentukan jarak :

- Simpul ke-5 dari titik asal
- Perut ke-7 dari titik asal

### 3. Hukum Melde

Hukum Melde mempelajari tentang besaran-besaran yang mempengaruhi cepat rambat gelombang transversal pada tali. Melalui percobaannya (lakukan kegiatan 1.1), Melde menemukan bahwa cepat rambat gelombang pada dawai sebanding dengan akar gaya tegangan tali dan berbanding terbalik dengan akar massa persatuan panjang dawai.

Dari hasil percobaan itu dapat diperoleh perumusan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} v^2 &\sim \sqrt{F} \\ v^2 &\sim \frac{1}{\mu} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

## Kegiatan 1.1

### Hukum Melde

**Tujuan** : Menentukan hubungan  $\lambda$  dan  $F$  pada dawai yang digetarkan.

**Alat dan bahan** : Tiker timer, benang, beban, penggaris, power supply.

**Kegiatan** :

1. Rangkai alat seperti pada *Gambar 1.9*. Kemudian sambungkan tiker timer ke power supply sehingga benang dapat membentuk pola gelombang.



**Gambar 1.9**

2. Frekuensi gelombang sama dengan frekuensi getaran dan sama pula dengan frekuensi yang dihasilkan power supply biasanya  $f = 50$  Hz.
3. Gunakan beban  $m$  ( $F = mg$ ) dan ukurlah panjang gelombang  $\lambda$ .
4. Ulangi langkah (1) dan (2) dengan mengubah beban  $m$ .

### Tugas

1. Catat semua data pada tabel.
2. Buatlah grafik hubungan  $v^2$  dengan  $F$ .
3. Buatlah simpulan.

**CONTOH 1.5**

Cepat rambat gelombang transversal pada dawai yang tegang sebesar 10 m/s saat besar tegangannya 150 N. Jika dawai diperpanjang dua kali dan tegangannya dijadikan 600 N maka tentukan cepat rambat gelombang pada dawai tersebut!

**Penyelesaian**

Dari soal di atas dapat dibuatkan peta konsep dan beberapa metode penyelesaian seperti di bawah.

$$v_1 = 10 \text{ m/s}, F_1 = 150 \text{ N}, \ell_1 = \ell$$

$$v_2 = ?, F_2 = 600 \text{ N}, \ell_2 = 2\ell$$

Dari data pertama dapat diperoleh massa persatuan panjang :

$$v_1 = \sqrt{\frac{F_1}{\mu_1}} \rightarrow 10 = \sqrt{\frac{150}{\mu_1}}$$

$$100 = \frac{150}{\mu_1} \rightarrow \mu_1 = 1,5 \text{ kg/m}$$

**Keadaan kedua**

Dawai jenisnya tetap berarti  $m_2 = m_1$ , sehingga  $v_2$  dapat diperoleh :

$$v_2 = \sqrt{\frac{F_2}{\mu_1}} = \sqrt{\frac{600}{1,5}} = \sqrt{400} = 20 \text{ m/s}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Pada percobaan Melde digunakan seutas benang yang panjangnya 2 m dan massanya 10 gram. Jika beban yang digunakan pada percobaan itu 200 gram ( $g = 10 \text{ ms}^{-2}$ ), hitunglah kecepatan gelombang transversal pada benang!

**LATIHAN 1.3**

1. Seutas tali yang panjangnya 1,5 m salah satu ujungnya terikat dan ujung lainnya digetarkan terus menerus dengan periode 0,05 detik dan menghasilkan gelombang dengan laju 8 m/s. Setelah terbentuk gelombang stasioner, timbullah daerah simpul dan perut, berapakah jarak antaranya ?
2. Seutas dawai yang panjangnya 1 meter dan massanya 25 gram ditekang dengan gaya sebesar 2,5 N.

Dawai tersebut digetarkan sehingga menghasilkan gelombang transversal stasioner. Berapakah besar kecepatan rambat gelombang ?

3. Seutas tali panjang 40 m digetarkan transversal. Laju rambat gelombang transversal pada tali tersebut 50 m/s. Jika gaya tegangan pada tali tersebut 2,5 N, maka tentukan massa talipersatuan panjang !

## D. Sifat-Sifat Gelombang

Kalian tentu sering menemui atau mengamati sifat-sifat gelombang. Sifat-sifat itu dapat dijelaskan sebagai berikut.

### 1. Gelombang dapat mengalami pemantulan

Semua gelombang dapat dipantulkan jika mengenai penghalang. Contohnya seperti gelombang stationer pada tali. Gelombang datang dapat dipantulkan oleh penghalang. Contoh lain kalian mungkin sering mendengar gema yaitu pantulan gelombang bunyi. Gema dapat terjadi di gedung-gedung atau saat berekreasi ke dekat tebing.

### 2. Gelombang dapat mengalami pembiasan

Pembiasan dapat diartikan sebagai pembelokan gelombang yang melalui batas dua medium yang berbeda. Pada pembiasan ini akan terjadi perubahan cepat rambat, panjang gelombang dan arah. Sedangkan frekuensinya tetap.

### 3. Gelombang dapat mengalami pemantulan

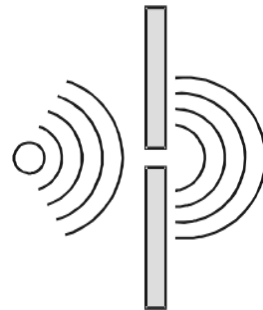
Interferensi adalah perpaduan dua gelombang atau lebih. Jika dua gelombang dipadukan maka akan terjadi dua kemungkinan yang khusus, yaitu saling menguatkan dan saling melemahkan.

Interferensi saling menguatkan disebut *interferensi konstruktif* dan terpenuhi jika kedua gelombang *sefase*.

Interferensi saling melemahkan disebut *interferensi destruktif* dan terpenuhi jika kedua gelombang *berlawanan fase*.

### 4. Gelombang dapat mengalami difraksi

Difraksi disebut juga pelenturan yaitu gejala gelombang yang melentur saat melalui lubang kecil sehingga mirip sumber baru. Perhatikan *Gambar 1.10*. Gelombang air dapat melalui celah sempit membentuk gelombang baru.



**Gambar 1.10**  
Peristiwa difraksi

## Rangkuman Bab 1

1. Gelombang adalah rambat energi getaran.

Besar-besarannya:

- a. periode  $T$
- b. frekuensi  $f$

$$T = \frac{1}{f}$$

- c. cepat rambat  $v$
  - d. panjang gelombang  $\lambda$
- $$v = \lambda \cdot f$$

2. Gelombang berjalan:

- a. simpangan

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

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

- b. fase

$$\phi = \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

3. Hukum Melde

Cepat rambat gelombang transversal pada dawai memenuhi:

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

4. Sifat-sifat gelombang

Secara gelombang dapat mengalami : pemantulan, pembiasan, interferensi dan difraksi.

# Evaluasi Bab

1. Suatu gelombang permukaan air yang frekuensinya 500 Hz merambat dengan kecepatan  $350 \text{ ms}^{-1}$ . Jarak antara dua titik yang berbeda fase  $60^\circ$  adalah sekitar ....  
A. 64 cm  
B. 42 cm  
C. 33 cm  
D. 21 cm  
E. 12 cm
2. Berdasarkan nilai amplitudonya, gelombang dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu ....  
A. gelombang mekanik dan gelombang stasioner  
B. gelombang elektromagnetik dan gelombang stasioner  
C. gelombang berjalan dan gelombang mekanik  
D. gelombang berjalan dan gelombang stasioner  
E. gelombang berjalan dan gelombang transversal
3. Suatu gelombang dinyatakan dengan persamaan  $y = 0,20 \sin 0,40 \pi (x - 60t)$ . Bila semua jarak diukur dalam cm dan waktu dalam sekon, maka pernyataan berikut ini:  
(1) panjang gelombang bernilai 5 cm  
(2) frekuensi gelombangnya bernilai 12 Hz  
(3) gelombang menjalar dengan kecepatan  $60 \text{ cm s}^{-1}$   
(4) simpangan gelombang 0,1 cm pada posisi  $x = 35/12 \text{ cm}$  dan saat  $t = 1/24 \text{ sekon}$   
yang benar adalah nomor ....  
A. 1, 2, 3 dan 4  
B. 1, 2 dan 3  
C. 1 dan 3  
D. 2 dan 4  
E. 4
4. Seutas tali yang panjangnya 4 m kedua ujungnya diikat erat-erat. Kemudian pada tali ditimbulkan gelombang sehingga terbentuk 8 buah perut, maka letak perut kelima dari ujung terjauh adalah ....  
A. 1,50 m  
B. 1,75 m  
C. 2,00 m  
D. 2,25 m  
E. 2,50 m
5. Kecepatan rambat gelombang dalam dawai tegang dari bahan tertentu dapat diperkecil dengan ....  
A. memperpendek dawai  
B. memperbesar massa dawai per satuan panjang  
C. memperbesar luas penampang dawai  
D. memperbesar tegangan dawai  
E. memperkecil massa jenis dawai
6. Kawat untuk saluran transmisi listrik yang massanya 40 kg diikat antara dua menara tegangan tinggi yang jaraknya 200 m. Salah satu ujung kawat dipukul oleh teknisi yang berada di salah satu menara sehingga timbul gelombang yang merambat ke menara yang lain. Jika gelombang pantul terdeteksi setelah 10 sekon, maka tegangan kawat (dalam newton) adalah ....  
A. 40  
B. 60  
C. 80  
D. 320  
E. 420
7. Tali yang panjangnya 5 m bertegangan 2 N dan digetarkan sehingga terbentuk gelombang stasioner. Jika massa tali  $6,25 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ , maka cepat rambat gelombang di tali adalah .... (dalam m/s)  
A. 2  
B. 5  
C. 6  
D. 10  
E. 40

## B A B

# 2

## BUNYI



Sumber: [www.jatim.go.id](http://www.jatim.go.id)

Apakah yang kalian amati saat melihat orang meniup atau bermain terompet atau seruling? Coba lihat gambar di atas. Mengapa terompet atau seruling itu ada beberapa lubangnya. Mengapa saat ditiup dilakukan penekanan berulang-ulang? Apa saja yang perlu dipelajari pada bab bunyi?

Pertanyaan-pertanyaan di atas dapat kalian pelajari pada bab ini. Oleh sebab itu setelah belajar bab ini kalian diharapkan dapat:

1. menjelaskan syarat-syarat terdengarnya bunyi,
2. menentukan frekuensi dari nada-nada pada dawai dan pipa organa,
3. menentukan intensitas dan taraf intensitas suatu bunyi,
4. menentukan frekuensi yang diterima pendengar karena efek Doppler,
5. menjelaskan terjadinya pelayangan.



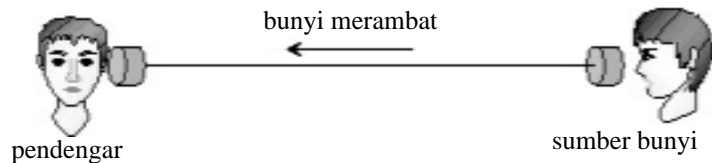
## A. Pendahuluan

Kalian tentu tidak asing dengan kata bunyi atau disebut juga suara. Bunyi merupakan salah satu contoh gelombang longitudinal yang membutuhkan medium (disebut gelombang mekanik). Jika kita bercakap-cakap maka bunyi yang kita dengar merambat dari pita suara yang berbicara menuju pendengar melalui medium udara.

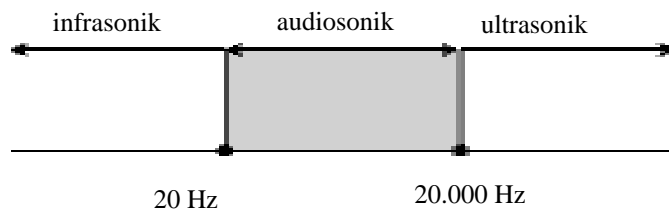
Bagaimana kita dapat mendengar bunyi? Ada beberapa syarat bunyi dapat terdengar telinga kita. *Pertama* adalah adanya sumber bunyi. Misalnya ada gitar yang dipetik, ada yang bersuara dan ada suara kendaraan lewat. *Kedua* : harus ada mediumnya. Ingat sesuai keterangan di atas bunyi termasuk gelombang mekanik berarti membutuhkan medium. Dapatkah astronot bercakap-cakap secara langsung (tidak menggunakan alat elektronika) saat di bulan? Tentu jawabannya tidak karena bulan tidak memiliki atmosfer (tidak ada medium). Bunyi dapat merambat dalam medium udara (zat gas), air (zat cair) maupun zat padat. Pernahkah kalian melihat dua anak bercakap-cakap melalui benang seperti *Gambar 2.1*? Mungkin kalian pernah mencobanya.

**Gambar 2.1**

Bunyi dapat merambat melalui zat padat (benang).



*Ketiga*, bunyi dapat didengar telinga jika memiliki frekuensi 20 Hz s.d 20.000 Hz. Batas pendengaran manusia adalah pada frekuensi tersebut bahkan pada saat dewasa terjadi pengurangan interval tersebut karena faktor kebisingan atau sakit. Berdasarkan batasan pendengaran manusia itu gelombang dapat dibagi menjadi tiga yaitu *audiosonik* (20-20.000 Hz), *infrasonik* (di bawah 20 Hz) dan *ultrasonik* (di atas 20.000 Hz).



**Gambar 2.2**

Pembagian bunyi berdasarkan frekuensinya.

Binatang-binatang banyak yang dapat mendengar di luar audio sonik. Contohnya jangkrik dapat mendengar infrasonik (di bawah 20 Hz), anjing dapat mendengar ultrasonik (hingga 25.000 Hz).

## B. Tinggi Nada dan Pola Gelombang

Setiap bunyi yang didengar manusia selalu memiliki frekuensi tertentu. Untuk memenuhi frekuensi yang diharapkan maka munculnya berbagai alat musik, misalnya seruling dan gitar. Saat bermain gitar maka dawaiinya akan dipetik untuk mendapatkan frekuensi yang rendah atau tinggi. Tinggi rendahnya frekuensi bunyi yang teratur inilah yang dinamakan *tinggi nada*. Sedangkan pola-pola terjadinya gelombang disebut *pola gelombang*. Pada saat di SMA kelas XII ini dapat dipelajari tinggi nada dan pola gelombang pada dawai dan pipa organa.

### 1. Pola Gelombang pada Dawai

Contoh pemanfaatan dawai ini adalah gitar. Pernahkah kalian bermain gitar? Apa yang terjadi saat dawai itu dipetik? Jika ada dawai yang terikat kedua ujungnya maka saat terpetik dapat terjadi pola-pola gelombang seperti pada *Gambar 2.3*.

Kemungkinan pertama terjadi seperti pada *Gambar 2.3(a)*. Pola ini disebut *nada dasar* ( $n = 0$ ). Pada gelombang stasioner terjadi 2 simpul dan 1 perut dan memenuhi  $\ell = \frac{1}{2} \lambda$ .

Jika dipetik di tengah dawai, maka akan terbentuk pola gelombang seperti *Gambar 2.3(b)*. Ada 3 simpul dan 2 perut. Pola ini dinamakan nada atas pertama ( $n = 1$ ) dan berlaku :  $\ell = \lambda$ . Sedangkan pada *Gambar 2.3(c)* dinamakan nada atas kedua,  $\ell = \frac{3}{2} \lambda$ . Jika pola gelombangnya digambarkan terus maka setiap kenaikan satu nada akan bertambah  $\frac{1}{2}$  gelombang lagi. Sifat dawai ini dapat dituliskan seperti berikut.

Pola gelombang dawai

nada ,  $n = 0, 1, 2, \dots$

panjang,  $\ell = \frac{1}{2} \lambda, \lambda, \frac{3}{2} \lambda, \dots$

..... (2.1)

Bagaimana jika ingin menghitung frekuensi nadanya? Sesuai sifat gelombang, pada bunyi juga berlaku hubungan  $v = \lambda f$ . Panjang gelombang  $\lambda$  dapat ditentukan dari persamaan 2.1 sedangkan  $v$  dapat ditentukan dari

hukum Melde,  $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ . Sehingga frekuensinya

Contohnya pada nada dasar dapat berlaku:

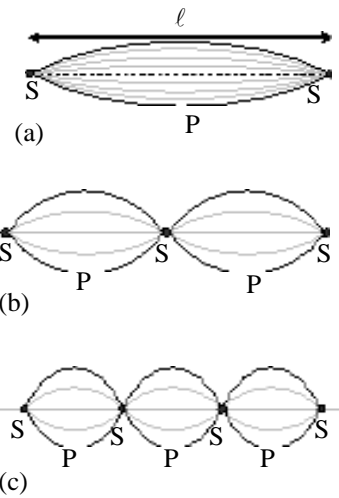
$$\ell = \frac{1}{2} \lambda \rightarrow \lambda = \ell$$

$$f_o = \frac{1}{2\ell} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

### CONTOH 2.1

Dawai sepanjang 20 cm memiliki massa 20 gr. Jika ujung-ujung dawai diikat sehingga memiliki tegangan 30 N maka tentukan :

- panjang gelombang pada nada atas keduanya
- frekuensi nada atas keduanya?



**Gambar 2.3**

Pola gelombang pada dawai.

**Penyelesaian**

$$\ell = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$$

$$m = 20 \text{ gr} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ kg}$$

$$F = 30 \text{ N}$$

- a. Nada atas kedua,  $n = 2$

$$\ell_2 = \frac{3}{2} \lambda$$

$$0,6 = \frac{3}{2} \cdot \lambda \rightarrow \lambda = 0,4 \text{ m}$$

- b. Frekuensi nada atas kedua

Cepat rambat gelombang memenuhi hukum Melde :

$$v = \sqrt{\frac{F\ell}{m}}$$

$$= \sqrt{\frac{30 \cdot 0,6}{2 \cdot 10^{-2}}} = 30 \text{ m/s}$$

Berarti frekuensi nada atas kedua sebesar :

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{300}{0,4} = 750 \text{ Hz}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Seutas dawai panjang 80 cm memiliki massa 9 gr. Jika kedua ujungnya dijepit dan ditegangkan dengan tegangan 200 N maka tentukan :

- frekuensi nada dasar
- frekuensi nada atas pertama
- frekuensi nada atas kedua
- perbandingan  $f_0 : f_1 : f_2$  !

## 2. Pipa Organa

Kalian tentu pernah melihat seruling atau terompet dan mendengar suaranya. Keduanya merupakan alat musik tiup. Alat musik itulah contoh dari pipa organa. Pipa organa merupakan semua pipa yang berongga didalamnya. Bahkan kalian dapat membuatnya dari pipa paralon.

Pipa organa ini ada dua jenis yaitu *pipa organa terbuka* berarti kedua ujungnya terbuka dan *pipa organa tertutup* berarti salah satu ujungnya tertutup dan ujung lain terbuka. Kedua jenis pipa ini memiliki pola gelombang yang berbeda. Perhatikan penjelasan berikut.

### a. Pipa organa terbuka

Apabila pipa organa ditiup maka udara-udara dalam pipa akan bergetar sehingga menghasilkan bunyi. Gelombang yang terjadi merupakan gelombang longitudinal.

Untuk mempermudah melihat pola gelombangnya dapat digambarkan simpangan getarnya partikel-partikel warnanya. Ujung-ujung terbukanya terjadi regangan sehingga terjadi rapatan maupun regangan (simpul dan perut).

Pola gelombang yang terjadi pada organa terbuka dapat terlihat seperti pada *Gambar 2.4*. Bagian (a) terjadi nada dasar ( $n = 0$ ),  $\ell = \frac{1}{2}\lambda$ , bagian (b) terjadi nada atas pertama ( $n = 1$ ),  $\ell = \lambda$  dan bagian (c) terjadi nada atas kedua ( $n = 2$ ),  $\ell = \frac{3}{2}\lambda$ . Pola ini jika diteruskan akan selalu bertambah  $\frac{1}{2}\lambda$  setiap peningkatan nada ke atas. Dari gambaran itu dapat dirumuskan seperti berikut.

Pipa organa terbuka :

nada :  $n = 0, 1, 2, \dots$

panjang :  $\ell = \frac{1}{2}\lambda, \lambda, \frac{3}{2}\lambda, \dots$

..... (2.3)

Dari persamaan 2.3 ini dapat ditentukan besar frekuensi nadanya dengan persamaan berikut.

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

### CONTOH 2.2

Sebuah pipa dari bambu panjangnya 20 cm. Cepat rambat bunyi di udara saat itu 320 m/s. Tentukan panjang gelombang dan frekuensi nada dasar dan nada atas keduanya saat ditiup!

#### Penyelesaian

$$\ell = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$

$$v = 320 \text{ m/s}$$

■ Nada dasar :

$$\ell = \frac{1}{2}\lambda_0$$

$$\lambda_0 = 2\ell = 2 \cdot 0,2 = 0,4 \text{ m}$$

$$f_0 = \frac{v}{\lambda_0} = \frac{320}{0,4} = 800 \text{ Hz}$$

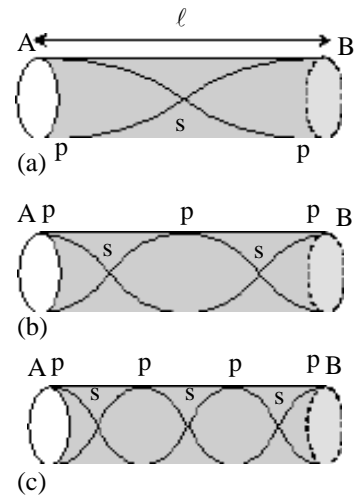
■ Nada atas kedua :

$$\ell = \frac{3}{2}\lambda_2$$

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2}$$

$$\lambda_2 = \frac{2}{3}\ell = \frac{2}{3} \cdot 0,133 = 0,4 \text{ m}$$

$$= \frac{320}{0,133} = 2400 \text{ Hz}$$



**Gambar 2.4**

Pola gelombang pada pipa organa terbuka.

### Penting

Perbandingan frekuensi pada nada-nada dawai dan pipa organa memiliki pola yang sama.

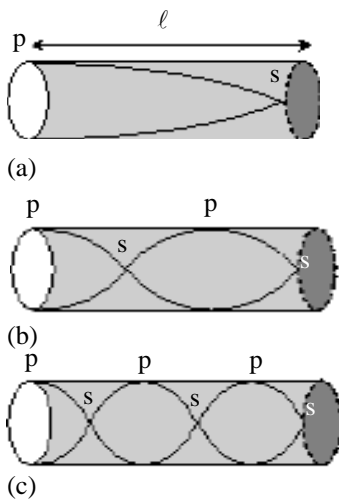
$$f_0 : f_1 : f_2 : \dots = 1 : 2 : 3 : \dots$$

Perbedaan dari kedua sumber bunyi itu adalah pada jumlah simpul dan perutnya. Perhatikan *Gambar 2.3* dan *Gambar 2.4*.

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Sebuah pipa organa terbuka panjangnya 30 cm. Pada saat ditiupkan udara ternyata kecepatan bunyinya 340 m/s. Tentukan :

- panjang gelombang dan frekuensi nada dasar, atas pertama dan atas kedua.
- tentukan perbandingan  $f_0 : f_1 : f_2$ !



**Gambar 2.5**

Pola gelombang pipa organa tertutup.

### b. Pipa organa tertutup

Pipa organa tertutup berarti salah satu ujungnya tertutup dan ujung lain terbuka. Saat ditiup maka pada ujung terbuka terjadi regangan dan pada ujung tertutup terjadi rapatan. Pola gelombang simpangan getar partikel udara dapat digambarkan seperti pada *Gambar 2.5*.

Pada *Gambar 2.5(a)* terjadi nada dasar ( $n = 0$ )  $\ell = \frac{1}{4}\lambda$ , bagian (b) menunjukkan nada atas pertama ( $n = 1$ ),  $\ell = \frac{3}{4}\lambda$ , dan bagian (c) menunjukkan nada atas kedua ( $n = 2$ ),  $\ell = \frac{5}{4}\lambda$ . Pola ini akan terus bertambah  $\frac{1}{2}\lambda$  setiap naik satu nada dan dapat dirumuskan sebagai berikut.

Pipa organa tertutup :

$$\text{nada : } n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.4)$$

$$\text{panjang : } \ell = \frac{1}{4}\lambda, \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda, \dots \quad (2.3)$$

### CONTOH 2.3

- Pipa organa tertutup memiliki panjang 18 cm. Pada saat ditiup terjadi nada atas pertama. Jika cepat rambat bunyi di udara saat itu 330 m/s maka tentukan panjang gelombang dan frekuensi nada tersebut!

#### Penyelesaian

$$\ell = 18 \text{ cm}, \quad n = 1$$

$$v = 330 \text{ m/s}$$

Panjang gelombangnya :

$$\ell = \frac{3}{4}\lambda_1$$

$$\lambda_1 = \frac{4\ell}{3} = \frac{4 \cdot 18}{3} = 24 \text{ cm} = 0,24 \text{ m dan}$$

frekuensinya sebesar :

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{330}{0,24} = 1375 \text{ Hz}$$

2. Pipa organa terbuka dan tertutup ditiup secara bersamaan. Pipa organa terbuka yang panjangnya 30 cm terjadi nada atas kedua. Berapakah panjang pipa organa tertutup yang harus dipakai agar terjadi resonansi pada nada atas pertamanya?

**Penyelesaian**

$$\ell_A = 30 \text{ cm}, n_A = 2$$

$$\ell_B = ?, n_B = 1$$

Terjadi resonansi berarti  $f_A = f_B$  dan juga  $\ell_A =$

$\ell_B$ . Perbandingan panjangnya memenuhi :

$$\frac{\ell_{B1}}{\ell_{A2}} = \frac{\frac{3}{4}\lambda_B}{\frac{3}{2}\lambda_A}$$

$$\frac{\ell_{B1}}{30} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{\ell_{B1}}{30} = \frac{1}{2} \text{ berarti } \ell_{B1} = 15 \text{ cm}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Pada pipa organa terbuka nada atas pertama dihasilkan panjang gelombang sebesar 60 cm dan pada pipa organa tertutup nada atas pertama dihasilkan panjang gelombang sebesar  $\lambda$ . Bila kedua pipa panjangnya sama, maka berapakah nilai ?



## ATIHAN 1

- Dawai piano yang panjangnya 0,5 m dan massanya  $10^{-2}$  kg ditekankan 200 N, maka saat dipetik akan menghasilkan nada-nada. Tentukan :
  - frekuensi nada dasar dan
  - frekuensi nada atas kedua yang dihasilkan piano !
- Seutas dawai panjangnya 90 cm bergetar dengan nada atas pertama berfrekuensi 300 Hz, maka tentukan :
  - panjang gelombang di dawai,
  - cepat rambat gelombang pada dawai,
  - frekuensi nada dasar dawai,
  - frekuensi nada atas kedua dawai!
- Sebuah pipa organa terbuka yang memiliki panjang 60 cm menghasilkan suatu nada. Cepat rambat bunyi di udara 300 m/s. Jika pipa tersebut menghasilkan nada atas kedua maka berapakah frekuensi gelombang bunyi yang terjadi?
- Pada suatu pipa organa terbuka dengan panjang 40 cm di dalamnya terjadi dua buah simpul. Nada dari pipa ini beresonansi dengan pipa organa lain yang tertutup serta membentuk empat simpul, maka berapakah panjang pipa organa tertutup itu?
- Dua pipa organa terbuka panjang dan suhunya sama ditiup seorang anak secara bergantian. Pipa organa pertama menghasilkan nada atas pertama sedang pipa organa kedua menghasilkan nada atas kedua. Tentukan perbandingan frekuensi pipa organa pertama dan kedua!
- Pada suatu hari ketika laju rambat bunyi sebesar 345 m/s, frekuensi dasar suatu pipa organa yang tertutup salah satu ujungnya adalah 220 Hz. Jika nada atas kedua pipa organa tertutup ini panjang gelombangnya sama dengan nada atas ketiga suatu pipa organa yang terbuka kedua ujungnya, maka berapakah panjang pipa organa terbuka itu ?

## C. Intensitas dan Taraf Intensitas

### 1. Intensitas Bunyi

Gelombang merupakan rambatan energi getaran. Jika ada gelombang tali berarti energinya dirambatkan melalui tali tersebut. Bagaimana dengan bunyi? Bunyi dirambatkan dari sumber ke pendengar melalui udara. Yang menarik bahwa bunyi disebarkan dari sumber ke segala arah.

Jika seseorang berdiri berjarak  $R$  dari sumber akan mendengar bunyi maka bunyi itu telah tersebar membentuk luasan bola dengan jari-jari  $R$ . Berarti energi yang diterima pendengar itu tidak lagi sebesar sumbernya. Sehingga yang dapat diukur adalah *energi yang terpancarkan tiap satu satuan waktu tiap satu satuan luas yang dinamakan dengan intensitas bunyi*. Sedangkan kalian tentu sudah mengenal bahwa besarnya energi yang dipancarkan tiap satu satuan waktu dinamakan dengan daya. Berarti intensitas bunyi sama dengan daya persatuan luas. Perhatikan persamaan berikut.

#### Penting

Perhatikan persamaan 2.4 jika  $A = 4\pi R^2$  maka persamaan

$$\text{menjadi : } \frac{P}{4\pi R^2}$$

Hubungan ini menjelaskan bahwa :

$$I \sim \frac{1}{R^2} \quad \text{atau} \quad \frac{I_1}{I_2} = \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2$$

$$I = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (2.5)$$

dengan :  $I$  = intensitas bunyi (watt/m<sup>2</sup>)

$P$  = daya bunyi (watt)

$A$  = luasan yang dilalui bunyi (m<sup>2</sup>)

$A = 4\pi R^2$  (untuk bunyi yang menyebar ke segala arah)

Untuk mencermati intensitas ini dapat kalian cermati contoh berikut.

#### CONTOH 2.4

Sebuah sumber bunyi memiliki daya  $10\pi$  watt dipancarkan secara sferis ke segala arah. Tentukan intensitas bunyi yang terukur oleh pendeteksi yang diletakkan di titik :

- A berjarak 10 m dari sumber,
- B berjarak 20 m dari sumber!

#### Penyelesaian

$$P = 10\pi \text{ watt}$$

$$R_A = 10 \text{ m}$$

$$R_B = 20 \text{ m}$$

- Intensitas di titik A sebesar :

$$I_A = \frac{P}{4\pi R_A^2}$$

$$= \frac{10\pi}{4\pi(10)^2} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ watt/m}^2$$

b. Intensitas di titik B :

Daya bunyi tetap berarti berlaku hubungan :

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

$$I \sim \frac{1}{R^2}$$

Dari hubungan di atas dapat ditentukan intensitas di titik B sebagai berikut.

$$\frac{I_B}{I_A} = \left( \frac{R_A}{R_B} \right)^2$$

$$\begin{aligned} I_B &= \left( \frac{10}{20} \right)^2 \cdot I_A \\ &= \frac{1}{4} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} = 6,25 \cdot 10^{-3} \text{ watt/m}^2 \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Sebuah alat ukur intensitas menunjukkan nilai  $2 \cdot 10^{-6}$  watt/m<sup>2</sup> saat berada pada jarak 5 m. Tentukan :

- daya sumber bunyi,
- intensitas pada titik yang berjarak 15 m dari sumber!

## 2. Taraf Intensitas Bunyi

Kalian tentu pernah mendengar bunyi dalam ruangan yang bising. Tingkat kebisingan inilah yang dinamakan dengan taraf intensitas. Taraf intensitas didefinisikan sebagai sepuluh kali logaritma perbandingan intensitas dengan intensitas ambang pendengaran.

$$TI = 10 \log \frac{I}{I_0} \dots\dots\dots (2.5)$$

dengan : TI = taraf intensitas (dB)

I = intensitas (watt/m<sup>2</sup>)

I<sub>0</sub> = intensitas ambang pendengar (10<sup>-12</sup> watt/m<sup>2</sup>)

Dari persamaan 2.5 dapat dikembangkan untuk menentukan taraf intensitas dari kelipatan intensitasnya. Misalnya ada n buah sumber bunyi yang terdengar bersamaan maka I<sub>n</sub> = n I dan taraf intensitasnya TI<sub>n</sub> memenuhi persamaan berikut.

### Penting

Taraf intensitas memiliki satuan sesuai dengan nama penemu telepon :

Alexander Graham Bell

1 bell = 10 dB



$$\begin{aligned}
 TI_n &= 10 \log \frac{nI}{I_0} \\
 &= 10 \log \frac{I}{I_0} + 10 \log n
 \end{aligned}$$

$$TI_n = TI_1 + 10 \log n \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

Dengan menggunakan sifat logaritma yang sama dapat ditentukan taraf intensitas oleh kelipatan jarak  $k = \frac{R_2}{R_1}$ . Nilainya seperti persamaan berikut.

$$TI_2 = TI_1 - 20 \log k \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

### CONTOH 2.5

Seekor tawon yang berjarak 2 m dari pendeteksi memiliki taraf intensitas 40 dB. Tentukan :

- intensitas bunyi tawon pada tempat itu,
- taraf intensitas jika ada 1000 tawon,
- taraf intensitas jika seekor tawonnya berjarak 20 m.

#### Penyelesaian

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 2 \text{ m} \\
 TI_1 &= 40 \text{ dB} \\
 n &= 1000 \\
 R_2 &= 20 \text{ m}
 \end{aligned}$$

- a. Intensitas bunyi tawon memenuhi :

$$\begin{aligned}
 TI &= 10 \log \frac{I}{I_0} \\
 40 &= 10 \log \frac{I}{I_0} \\
 \frac{I}{I_0} &= 10^4
 \end{aligned}$$

$$I = 10^4 \cdot I_0 = 10^4 \cdot 10^{-12} = 10^{-8} \text{ watt/m}^2$$

- b. Taraf intensitas 1000 tawon memenuhi :

$$\begin{aligned}
 TI_n &= TI_1 + 10 \log n \\
 &= 40 + 10 \log 1000 = 70 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

- c. Taraf intensitas pada jarak  $R_2$

$$k = \frac{R_2}{R_1} = \frac{20}{2} = 10$$

$$TI_2 = TI_1 - 20 \log k$$

$$= 40 - 20 \log 10 = 20 \text{ dB}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Taraf intensitas yang dihasilkan oleh sebuah mesin tik sama dengan 70 dB. Jika pada suatu kantor terdapat 100 mesin tik dan dibunyikan secara bersamaan maka tentukan :

- intensitas satu mesin ketik,
- taraf intensitas 100 mesin ketik,
- taraf intensitas 100 mesin ketik saat pendeteksinya di jauhkan pada jarak 10 kali lebih jauh !



## ATIHAN 2

- Sebuah sumber bunyi memancarkan suara dengan nada 100 watt. Bunyi tersebut ke segala arah sama rata. Pada jarak 10 meter dari sumber tersebut seseorang mendengarkan sedemikian hingga penampang pendengarannya tegak lurus dengan arah perambatan bunyi. Berapakah intensitas bunyi yang masuk ke dalam telinga pendengar itu ?
- Sebuah alat ukur intensitas diletakkan pada 3 m dari suatu sumber bunyi, intensitas yang diterima pada jarak ini adalah  $5 \times 10^{-2} \text{ watt/m}^2$ . Agar intensitas bunyi yang diterima menjadi  $1,25 \times 10^{-2} \text{ watt/m}^2$ , maka tentukan pergeseran alat ukur tersebut !
- Suatu gelombang gempa terasa di Malang dengan intensitas  $6 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ . Sumber gempa berasal dari suatu tempat yang berjarak 300 km dari Malang. Jika jarak antara Malang dan Surabaya sebesar 100 km dan ketiga tempat itu membentuk segitiga siku-siku dengan sudut siku-siku di Malang, maka berapakah intensitas gempa yang terasa di Surabaya ?
- Suatu sumber bunyi titik dengan daya 12,56 watt memancarkan gelombang bunyi berupa gelombang sferis (bola). Hitunglah intensitas bunyi yang didengar oleh pendengar yang berjarak 10 meter dari sumber !
- Sebuah mesin jahit yang sedang bekerja menghasilkan intensitas bunyi sebesar  $2 \cdot 10^{-9} \text{ W/m}^2$ . Jika intensitas ambang bunyi  $= 10^{-12} \text{ W/m}^2$  maka berapakah taraf intensitas bunyi yang dihasilkan dari 5 mesin jahit sejenis yang sedang bekerja bersamaan ?
- Jika sebuah sepeda motor melewati seseorang, maka ia menimbulkan taraf intensitas sebesar 90 dB. Bila sekaligus orang itu dilewati 10 sepeda motor seperti itu, maka berapakah taraf intensitas yang ditimbulkannya ?
- Taraf intensitas bunyi suatu ledakan pada jarak 12 meter dari sumbernya adalah 80 dB. Berapakah taraf intensitas bunyi pada suatu tempat yang berjarak 120 meter dari sumber ledakan ?

## D. Efek Doppler dan Pelayangan

### 1. Efek Doppler

Pernahkah kalian mendengar efek Doppler? Istilah ini diambil dari nama seorang fisikawan Austria, *Christian Johann Doppler* (1803-1855). Doppler menemukan adanya perubahan frekuensi yang diterima pendengar dibanding dengan frekuensi sumbernya akibat gerak relatif pendengar dan sumber. Gejala perubahan frekuensi inilah yang dikenal sebagai *efek Doppler*.

Contoh gejala ini dapat digambarkan seperti pada *Gambar 2.6* pada bagian (a) sumber mampu menerima A dan B diam atau relatif diam maka frekuensi bunyi yang diterima A dan B akan sama dengan yang dipancarkan oleh sumber. Bagaimana dengan bagian (b), sumber bunyi bergerak ke arah B dengan kecepatan  $v_s$ . Saat sumber dan penerima relatif bergerak ke arah B maka penerima akan mendapat frekuensi bunyi lebih besar dari sumber, sedangkan penerima A lebih kecil.

Menurut Doppler, perubahan frekuensi bunyi itu memenuhi hubungan : kecepatan relatifnya sebanding dengan frekuensi.

$$f \sim \Delta v$$

$$\frac{f_p}{f_s} = \frac{\Delta v_p}{\Delta v_s}$$

$\Delta v$  adalah kecepatan relatif bunyi terhadap pandangan. Nilainya dapat dituliskan juga  $\Delta v_p = v \pm v_p$ . Berarti berlaku juga  $\Delta v_s = v \pm v_s$ . Dengan substitusi nilai  $\Delta v_p$  dan  $\Delta v_s$  dapat diperoleh persamaan efek Doppler seperti berikut.

$$f_p = \frac{v \pm v_p}{v \pm v_s} \cdot f_s \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

dengan :  $f_p$  = frekuensi bunyi yang diterima pendengar (Hz)

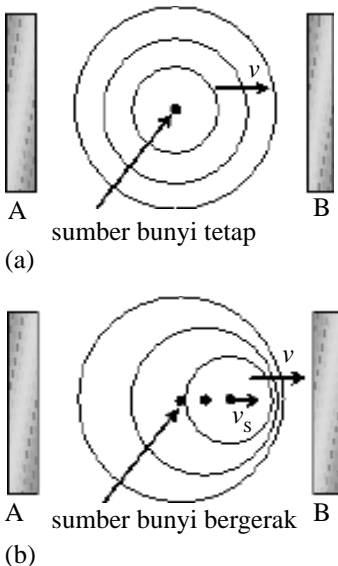
$f_s$  = frekuensi bunyi sumber (Hz)

$v$  = cepat rambat bunyi di udara (m/s)

$v_s$  = kecepatan sumber bunyi (m/s)

$v_p$  = kecepatan pendengar (m/s)

( $\pm$ ) = operasi kecepatan relatif, (+) untuk kecepatan berlawanan arah dan (-) untuk kecepatan searah



**Gambar 2.6**  
Peristiwa efek Doppler

### CONTOH 2.6

1. Mobil ambulan bergerak dengan kecepatan 20 m/s sambil membunyikan sirinnya yang memiliki frekuensi 1080 Hz. Pada saat itu ada seseorang yang mengendarai sepeda motor sedang berpapasan dengan ambulan.

Kecepatan sepeda motornya 10 m/s. Berapakah frekuensi sirine yang diterima pengendara sepeda motor itu jika kecepatan bunyi saat itu 340 m/s?

**Penyelesaian**

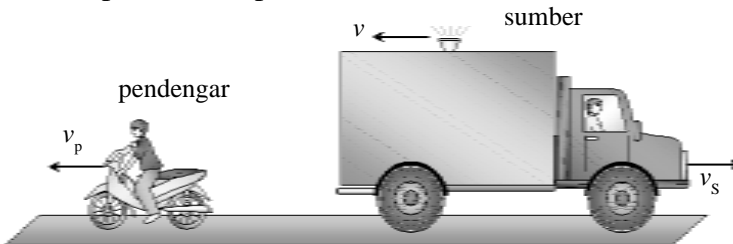
$$v = 340 \text{ m/s}$$

$$v_s = 20 \text{ m/s},$$

$$v_p = 10 \text{ m/s}$$

$$f_s = 1080 \text{ Hz}$$

Perhatikan gambar gerak relatif mobil ambulan dan sepeda motor pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7**  
Gerak relatif

$v_p$  searah  $v$  ( $v - v_p$ ) dan  $v_s$  berlawanan  $v$  ( $v + v_s$ ) berarti frekuensi yang diterima pengendara sepeda motor memenuhi :

$$\begin{aligned} f_p &= \frac{v - v_p}{v + v_s} \cdot f_s \\ &= \frac{340 - 10}{340 + 20} \cdot 1000 \\ &= 990 \text{ Hz} \end{aligned}$$

2. Sebuah sumber bunyi dengan frekuensi 1024 Hz bergerak mendekati pendengar dengan kecepatan 34 m/s. Kecepatan rambat bunyi di udara 340 m/s. Jika pendengar menjauhi sumber bunyi dengan kecepatan 17 m/s, maka berapa frekuensi bunyi yang diterima pendengar?

**Penyelesaian**

$$f_s = 1024 \text{ Hz},$$

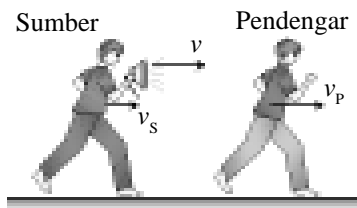
$$v = 340 \text{ m/s}$$

$$v_p = 17 \text{ m/s},$$

$$v_s = 34 \text{ m/s}$$

$v_s$  dan  $v_p$  sama-sama searah dengan  $v$ , maka :

$$\begin{aligned} f_p &= \frac{v - v_p}{v - v_s} \cdot f_s \\ &= \frac{340 - 17}{340 - 34} \cdot 1024 \\ &= 1080 \text{ Hz} \end{aligned}$$



**Gambar 2.8**  
Sumber mendekati pendengar

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Seseorang meniup terompet dengan frekuensi 1008 Hz sambil bergerak dengan kecepatan 4 m/s menuju pendengar yang mendekatinya dengan kecepatan 2 m/s. Apabila cepat rambat bunyi di udara 340 m/s berapakah frekuensi yang di dengar pengamat ?

## 2. Pelayangan

Pelayangan adalah peristiwa perubahan frekuensi bunyi yang berubah ubah dengan tajam karena ada dua sumber bunyi dengan perbedaan frekuensi yang kecil. Berarti pelayangan terjadi jika perbedaan frekuensi kedua sumbernya kecil. Perbedaan frekuensi atau frekuensi pelayangan itu memenuhi hubungan berikut.

$$\Delta f = |f_2 - f_1| \dots\dots\dots (2.9)$$

### CONTOH 2.7

Pipa organa A menghasilkan frekuensi  $f_A = 1005$  Hz, pipa organa B menghasilkan frekuensi  $f_B = 1000$  Hz dan pipa organa C menghasilkan frekuensi  $f_C = 500$  Hz. Pipa organa mana yang saat dibunyikan bersama-sama dapat menimbulkan pelayangan? Berapakah frekuensi pelayangannya?

#### Penyelesaian

$$f_A = 1005 \text{ Hz}$$

$$f_B = 1000 \text{ Hz}$$

$$f_C = 500 \text{ Hz}$$

Terjadi pelayangan jika beda frekuensinya kecil berarti yang dapat menghasilkan pelayangan adalah pipa organa A dan pipa organa B.

$$\begin{aligned} \Delta f &= |f_A - f_B| \\ &= |(1005 - 1000)| = 5 \text{ Hz} \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Dua pipa organa terbuka masing – masing panjangnya 1,00 meter dan 1,02 meter berbunyi pada nada dasarnya. Jika cepat rambat bunyi di udara 306 m/s, maka tentukan pelayangan yang akan terjadi !



### LATIHAN 3

1. Tentukan pernyataan berikut ini benar atau salah untuk frekuensi bunyi dari suatu sumber bunyi oleh seorang pendengar.
  - a. akan terdengar bertambah, jika sumber dan pendengar bergerak searah dengan pendengar di depan, dan kelajuan sumber lebih besar daripada kelajuan pendengar
  - b. akan terdengar bertambah, jika sumber diam dan pendengar mendekati sumber
  - c. akan terdengar berkurang, jika pendengar diam dan sumber bunyi menjauhi pendengar
  - d. akan terdengar tetap, jika sumber bunyi dan pendengar diam tetapi medium bergerak relatif menuju pendengar
2. Sebuah truk bergerak dengan kecepatan 36 km/jam dibelakang sepeda motor. Pada saat truk mengeluarkan bunyi klakson dengan frekuensi 1.000 Hz, pengemudi sepeda motor membaca pada spidometer angka 72 km/jam. Apabila kecepatan bunyi 340 ms<sup>-1</sup>, maka pengemudi sepeda motor akan mendengar klakson pada frekuensi  $f$ . Berapakah  $f$  tersebut ?
3. Sebuah mobil bergerak dengan kecepatan 20 m/s menjauhi seseorang yang sedang duduk di tepi jalan, sambil membunyikan klakson dengan frekuensi 400 Hz. Pada saat itu cepat rambat bunyi di udara 380 m/s, maka tentukan frekuensi klakson yang terdengar oleh orang tersebut !
4. Perubahan frekuensi suatu bunyi yang sumbernya bergerak mendekati pendengar diketahui 1 % dari frekuensi asalnya. Bila kecepatan rambat bunyi di udara adalah 300 m/s, maka hitunglah kecepatan sumber bunyi tersebut relatif terhadap pendengar !
5. Si X berdiri di samping sumber bunyi yang frekuensinya 676 hertz. Sebuah sumber bunyi lain dengan frekuensi 676 hertz mendekati Si X dengan kecepatan 2 m/detik. Bila kecepatan merambat bunyi di udara adalah 340 m/detik, maka berapakah frekuensi layangan yang didengar si X ?
6. Dua buah dawai baja yang identik menghasilkan nada dasar dengan frekuensi 60 Hz. Bila tegangan salah satu dawai dikurangi 19% dan kedua dawai digetarkan bersama-sama, maka tentukan frekuensi layangan yang terjadi!

## Rangkuman Bab 2

1. Pola gelombang pada dawai dan pipa organa memenuhi sifat-sifat berikut.

- a. nada-nadanya pada dawai dan pipa organa terbuka semua.

$$\text{nada, } n = 0, 1, 2, \dots$$

$$\text{panjang, } \ell = \frac{1}{2}\lambda, \lambda, \frac{3}{2}\lambda, \dots$$

- b. nada-nada pada pipa organa tertutup

$$\text{nada, } n = 0, 1, 2, \dots$$

$$\text{panjang, } \ell = \frac{1}{4}\lambda, \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda, \dots$$

- c. frekuensi nadanya memenuhi :

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

untuk dawai  $v$  dapat ditentukan dari hukum Melde.

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

2. Intensitas bunyi adalah besarnya energi yang dipancarkan tiap satu satuan waktu tiap satu satuan luas.

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

$A = 4\pi R^2$  (luasan bila gelombang sferis)

3. Taraf intensitas bunyi memenuhi definisi berikut.

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

$I_0 =$  intensitas ambang ( $10^{-12}$  watt/m<sup>2</sup>)

- a. untuk kelipatan jarak ( $n$  buah)

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

- b. untuk kelipatan jarak

$$TI_2 = TI_1 - 20 \log k \left( k = \frac{R_2}{R_1} \right)$$

4. Efek Doppler adalah efek perubah frekuensi yang diterima dari sumber karena gerak relatif.

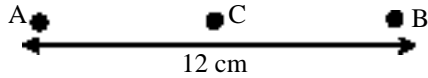
$$f_p = \frac{v \pm v_p}{v \pm v_s} \cdot f_s$$

5. Pelayangan adalah perbedaan frekuensi dua sumber yang kecil.

$$\Delta f = |f_2 - f_1|$$

## Evaluasi Bab

**Pilihlah jawaban yang benar pada soal – soal berikut dan kerjakan di buku tugas kalian.**

- Seutas dawai panjangnya 1,80 meter. Jika tegangan dawai diatur sedemikian hingga kecepatan gelombang transversal yang dihasilkannya adalah 900 m/s, maka frekuensi nada atas pertama adalah ....  
 A. 640 Hz                      D. 250 Hz  
 B. 500 Hz                      E. 125 Hz  
 C. 320 Hz
- Pipa organa terbuka yang panjangnya 25 cm menghasilkan frekuensi nada dasar sama dengan frekuensi yang dihasilkan oleh dawai yang panjangnya 150 cm. Jika cepat rambat bunyi di udara  $340 \text{ ms}^{-1}$  dan cepat rambat gelombang transversal pada dawai  $510 \text{ ms}^{-1}$  maka dawai menghasilkan ....  
 A. nada dasar  
 B. nada atas pertama  
 C. nada atas kedua  
 D. nada atas ketiga  
 E. nada atas keempat
- Bila tegangan suatu dawai gitar menjadi 4 kali lebih besar, maka nadanya mempunyai frekuensi yang ....  
 A. 4 kali lebih tinggi  
 B. 2 kali lebih tinggi  
 C. 4 kali lebih rendah  
 D. 2 kali lebih rendah  
 E. 16 kali lebih tinggi
- Apabila kita hendak menaikkan tinggi nada dari suatu dawai maka dapat dilakukan dengan cara ....  
 A. panjang dawai diperbesar  
 B. panjang dawai diperkecil  
 C. penampang dawai diperbesar  
 D. tegangan dawai diperkecil  
 E. dawai diganti dengan dawai yang lain jenisnya
- Jika sebuah pipa organa tertutup ditiup sehingga timbul nada atas ketiga, maka jumlah perut dan simpul yang terjadi berturut-turut adalah ....  
 A. 3 dan 3                      D. 4 dan 5  
 B. 3 dan 4                      E. 5 dan 4  
 C. 4 dan 4
- Nada dasar sebuah pipa organa tertutup beresonansi dengan nada atas pertama sebuah pipa organa terbuka. Apabila panjang tabung pipa organa terbuka 50 cm, maka panjang tabung pipa organa tertutup adalah ....  
 A. 2 m                          D. 0,25 m  
 B. 1 m                          E. 0,125 m  
 C. 0,05 m
- Intensitas bunyi dapat ditingkatkan dengan :  
 A. memperbesar frekuensi dan amplitudonya  
 B. memperbesar frekuensinya saja  
 C. memperkecil frekuensi dan amplitudonya saja  
 D. memperbesar amplitudonya saja  
 E. memperkecil amplitudonya dan memperbesar frekuensinya
- Sebuah sumber gelombang bunyi dengan daya 50W memancarkan gelombang ke medium sekelilingnya yang homogen. Tentukan intensitas radiasi gelombang tersebut pada jarak 10 m dari sumber !  
 A.  $4 \cdot 10^{-2} \text{ W/m}^2$                       D.  $4 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$   
 B.  $400 \text{ W/m}^2$                           E.  $200 \text{ W/m}^2$   
 C.  $40 \text{ W/m}^2$
- Perhatikan gambar di bawah! A dan B merupakan sumber bunyi yang memancar ke segala arah. Energi bunyi yang dipancarkan A dan B masing-masing 1,6 W dan 6,4 W. Agar intensitas bunyi yang diterima C maka dari A harus berjarak ....  




- A. 10 m  
B. 8 cm  
C. 6 cm
- D. 4 cm  
E. 2 cm
10. Sebuah sumber bunyi dengan daya 314 watt merambatkan energinya ke segala arah sama besar. Seorang pengamat mendeteksi taraf intensitasnya pada suatu tempat sebesar 100 dB. Jarak pengamat dengan sumber bunyi jika intensitas ambang  $I_0 = 10^{-16}$  watt/cm<sup>2</sup> adalah ....  
A. 50 m  
B. 100 m  
C. 5000 m  
D. 250 m  
E. 1000 m
11. Taraf intensitas bunyi sebuah mesin rata-rata 50 dB. Apabila 100 mesin dihidupkan bersamaan, maka taraf intensitasnya adalah ....  
A. 20 dB  
B. 50 dB  
C. 70 dB  
D. 75 dB  
E. 150 dB
12. Agar taraf intensitas berkurang 20 dB, jarak ke sumber bunyi harus dijadikan ... kali semula.  
A. 2  
B. 10  
C. 20  
D. 100  
E. 200
13. Taraf intensitas bunyi suatu tempat yang berjarak 5 m dari sumber bunyi sebesar 70 dB. Tempat yang berjarak 0,5 m dari sumber bunyi bertaraf intensitas sebesar ....  
A. 9 dB  
B. 80 dB  
C. 90 dB  
D. 100 dB  
E. 110 dB
14. Garpu tala X dan Y bila dibunyikan bersama-sama akan menghasilkan 300 layangan per menit. Garpu X memiliki frekuensi 300 Hz. Apabila garpu Y ditemplei setetes lilin, akan menghasilkan 180 layangan per menit dengan garpu X. Frekuensi asli dari garpu Y adalah ....  
A. 295 Hz  
B. 297 Hz  
C. 303 Hz  
D. 305 Hz  
E. 308 Hz
15. Jika sumber bunyi bergerakh dengan kecepatan  $v$  mendekati pendengar yang diam, dibandingkan dengan sumber bunyi diam dan pendengar mendekati sumber bunyi dengan kecepatan yang sama, maka terdengar bunyi ....  
A. yang pertama lebih tinggi daripada yang kedua  
B. yang pertama lebih keras daripada yang kedua  
C. sama tinggi  
D. yang pertama lebih lemah daripada yang kedua  
E. yang pertama lebih rendah daripada yang kedua
16. Sumber bunyi yang memancarkan bunyi dengan panjang gelombang 10 cm dan pendengar bergerak saling menjahui dengan kecepatan masing-masing 60 m/s dan 40 m/s. Kecepatan rambatan bunyi di udara 340 m/s. Frekuensi bunyi yang didengar adalah ....  
A. 3400 Hz  
B. 3230 Hz  
C. 3643 Hz  
D. 4533 Hz  
E. 2550 Hz
17. Suatu sumber bunyi dengan frekuensi 7200 Hz, bergerak berlawanan arah dengan pendengar yang bergerak dengan kelajuan 25 m/s, ternyata frekuensi bunyi yang didengar adalah 6300 Hz. Jika kelajuan perambatan bunyi di udara adalah 340 m/s, maka kecepatan sumber bunyi adalah ....  
A. 30 m/s  
B. 25 m/s  
C. 24 m/s  
D. 20 m/s  
E. 15 m/s
18. Mobil A mendekati pengamat (diam) dengan kecepatan 30 m/s sambil membunyikan sirine berfrekuensi 504 Hz. Saat itu juga mobil B mendekati P dari arah yang berlawanan dengan A, pada kecepatan 20 m/s sambil membunyikan sirine berfrekuensi 518 Hz. Jika cepat rambat bunyi di udara saat ini 300 m/s maka frekuensi layangan yang didengar P adalah ....  
A. 14 Hz  
B. 10 Hz  
C. 7 Hz  
D. 5 Hz  
E. 4 Hz

## B A B

# 3

# CAHAYA



Sumber: [www.fotografer.net](http://www.fotografer.net)

Kalian tidak asing dengan cahaya. Cahaya merupakan gelombang transversal. Sebagai gelombang cahaya memiliki sifat-sifat yang cukup banyak. Contohnya seperti pada gambar di atas. Seorang anak bermain dan meniup air sabun. Saat gelembung-gelembungnya terkena sinar matahari ternyata terjadi warna-warni. Sifat apakah yang ditunjukkan itu? Sifat apa lagi yang dimiliki cahaya?

Pertanyaan-pertanyaan di atas inilah yang dapat kalian pelajari pada bab ini. Oleh sebab itu setelah belajar bab ini diharapkan kalian dapat:

1. menjelaskan dan menerapkan interferensi cahaya,
2. menjelaskan dan menerapkan difraksi cahaya,
3. menentukan gejala-gejala yang dapat menyebabkan polarisasi.

## A. Interferensi Cahaya

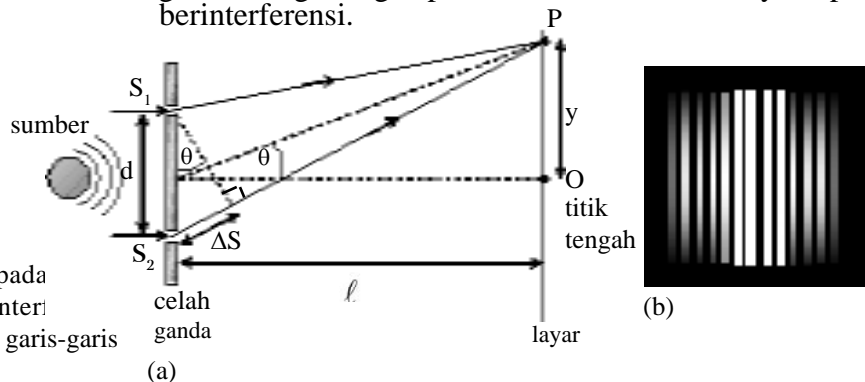
Sudah tahukah kalian apakah interferensi itu ? Interferensi adalah gabungan dua gelombang atau lebih. Cahaya merupakan gelombang yaitu gelombang elektromagnetik. Interferensi cahaya bisa terjadi jika ada dua atau lebih berkas sinar yang bergabung. Jika cahayanya tidak berupa berkas sinar maka interferensinya sulit diamati.

Beberapa contoh terjadinya interferensi cahaya dapat kalian perhatikan pada penjelasan berikut.

### 1. Interferensi Celah Ganda

Pada tahun 1804 seorang fisikawan bernama *Thomas Young* (1773-1829) dapat mendemonstrasikan interferensi cahaya. Young melewati cahaya koheren (sinar-sinar yang sefase dan frekuensi sama) melalui dua celah sempit yang dikenal dengan celah ganda.

Perhatikan *Gambar 3.1(a)*, dua berkas cahaya koheren dilewatkan pada celah ganda kemudian dapat mengenai layar. Pada layar itulah tampak pola garis-garis terang seperti pada *Gambar 3.1(b)*. Pola garis-garis terang dan gelap inilah bukti bahwa cahaya dapat berinterferensi.



**Gambar 3.1**

(a) Jalannya sinar pada celah ganda dan terjadi interferensi pada layar (b) Pola garis-garis terang pada layar

Interferensi cahaya terjadi karena adanya beda fase cahaya dari kedua celah tersebut. Berkas cahaya dari  $S_1$  dan  $S_2$  yang sampai pada layar terlihat berbeda lintasan sebesar  $\Delta S = d \sin \theta$ . Perbedaan panjang lintasan inilah yang dapat menimbulkan fase antara dua berkas cahaya tersebut berbeda. Interferensi akan saling menguatkan jika berkas cahaya sefase dan saling melemahkan jika berlawanan fase. Sefase berarti berbeda sudut fase  $\Delta \theta = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$ . Sedangkan berlawanan fase berarti berbeda sudut fase  $\Delta \theta = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ . Syarat ini dapat dituliskan dengan beda lintasan seperti persamaan berikut.

$$\text{Interferensi maksimum : } d \sin \theta = m \lambda$$

$$\text{Interferensi minimum : } d \sin \theta = \left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda \dots\dots (3.1)$$

dengan :  $d$  = jarak antar celah (m)  
 $\theta$  = sudut yang dibentuk berkas cahaya dengan garis mendatar  
 $m$  = pola interferensi (orde),  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$   
 $\lambda$  = panjang gelombang cahaya yang berinterferensi (m)

Perhatikan kembali *Gambar 3.1*. Untuk sudut  $\theta$  kecil ( $\theta \leq 12^\circ$ ) akan berlaku :  $\sin \theta \approx \tan \theta$  berarti selisih lintasannya memenuhi hubungan berikut.

$$d \sin \theta = \frac{dy}{\ell} \dots\dots\dots(3.2)$$

### Penting

Pada pola yang terjadi di layar  $m = 0$  berlaku untuk terang pusat. Sedangkan gelap pusat tidak ada jadi pola gelap terjadi mulai dari gelap 1 ( $m = 1$ )

## Kegiatan 3.1

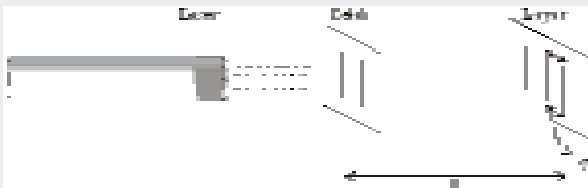
### Interferensi

**Tujuan** : Mempelajari hubungan jarak antar pola terang dengan jarak layar ke celah.

**Alat dan bahan** : Dua celah sempit, sinar laser, layar, penggaris.

**Kegiatan** :

1. Susun alat-alat seperti *Gambar 3.2*. Gunakan celah yang sempit, semakin sempit semakin baik. Jika perlu gunakan kisi.



← Gambar 3.2

2. Ukurlah jarak layar dari celah misalnya  $\ell = 30$  cm.
3. Nyalakan laser dan amati pola terang yang terjadi. Kemudian ukur jarak dua pola terang yang berdekatan  $\Delta y$ .
4. Ulangi langkah (1) sampai dengan (3) dengan mengubah  $\ell$ .

**Tugas**

1. Catat semua data pada tabel.
2. Gambarlah grafik hubungan  $\ell$  dengan  $\Delta y$ .
3. Buatlah simpulan

**CONTOH 3.1**

Seberkas cahaya monokromatik memiliki panjang gelombang  $5000 \text{ \AA}$  dilewatkan melalui celah ganda Young. Celah ganda berjarak  $0,2 \text{ mm}$  satu sama lain, kemudian  $80 \text{ cm}$  di belakang celah di pasang layar. Tentukan :

- a. jarak garis terang pertama dari terang pusat,
- b. jarak garis terang kedua dari terang pusat,
- c. jarak antara garis terang pertama dengan garis terang kedua pada layar !

**Penyelesaian**

$$\lambda = 5000 \text{ \AA} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\ell = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$$

$$d = 0,2 \text{ mm} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Terjadinya pola terang berarti memenuhi gabungan persamaan 3.1 dan 3.2 yaitu :

$$\frac{dy}{\ell} = m \cdot \lambda$$

- a. Untuk pola terang pertama ( $m = 1$ ) dari terang pusat dapat diperoleh:

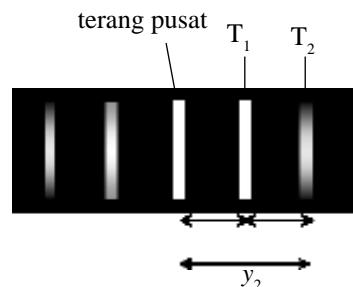
$$\frac{dy_1}{\ell} = 1 \cdot \lambda$$

$$\frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot y_1}{0,8} = 1 \cdot 5 \cdot 10^{-7}$$

$$y_1 = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,32 \text{ cm}$$

- b. Untuk pola terang kedua ( $m = 2$ ) dari terang pusat :

$$\frac{dy_2}{\ell} = 2 \cdot \lambda$$

**Gambar 3.3**

Jarak pola-pola terang

$$\frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot y_2}{0,8} = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-7}$$

$$y_2 = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 0,64 \text{ cm}$$

- c. Jarak pola terang pertama dengan pola terang ke dua yang berdekatan memenuhi :

$$\begin{aligned} \Delta y_{12} &= y_2 - y_1 \\ &= 0,64 - 0,32 = 0,32 \text{ cm} \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Cahaya dengan panjang gelombang  $4000 \text{ \AA}$  datang pada celah ganda yang jaraknya  $0,4 \text{ mm}$ . Pola interferensi yang terjadi ditangkap pada layar yang berada  $50 \text{ cm}$  dari celah ganda. Tentukan :

- jarak antara garis terang pertama dengan terang ketiga yang berdekatan,
- jarak antara dua garis terang berdekatan
- jarak antara garis gelap pertama dengan gelap kelima yang berdekatan !

## 2. Interferensi pada Lapisan Tipis

Kalian tentu pernah main air sabun yang ditiup sehingga terjadi gelembung. Kemudian saat terkena sinar matahari akan terlihat warna-warni. Cahaya warna-warni inilah bukti adanya peristiwa interferensi cahaya pada lapisan tipis air sabun.

Interferensi ini terjadi pada sinar yang dipantulkan langsung dan sinar yang dipantulkan setelah dibiaskan. Syarat terjadinya interferensi memenuhi persamaan berikut.

$$\text{Interferensi maksimum : } 2nd = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad \dots (3.3)$$

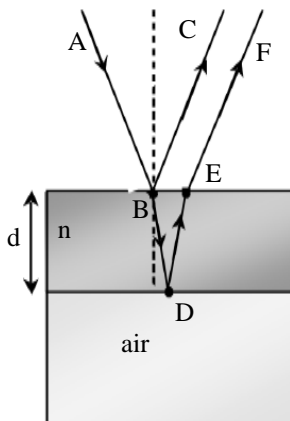
$$\text{Interferensi minimum : } 2nd = m \cdot \lambda$$

dengan :  $n$  = indeks bias lapisan

$d$  = tebal lapisan (m)

$\lambda$  = panjang gelombang cahaya (m)

$m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$



**Gambar 3.4**

Jalannya sinar yang mengenai lapisan tipis.

**CONTOH 3.2**

Lapisan minyak berada di atas air dapat memantulkan warna merah. Hal ini dapat membuktikan bahwa warna biru mengalami interferensi dan hilang dari spektrum. Jika indeks bias minyak 1,5 dan panjang gelombang sinar biru sebesar 4500 Å, maka tentukan tebal minimum minyak tersebut!

**Penyelesaian**

$$n = 1,5$$

$$\lambda = 4500 \text{ Å} = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Warna biru hilang berarti terjadi interferensi minimum dan tebal minimum terjadi untuk  $m = 1$  sehingga diperoleh :

$$2nd = m\lambda$$

$$2 \cdot 1,5 \cdot d = 1 \cdot 4,5 \cdot 10^{-7}$$

$$d = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

*Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.*

Cahaya merah dengan panjang gelombang 7000 Å datang tegak lurus pada lapisan tipis minyak yang indeks biasnya 1,25. Berapakah tebal minimum minyak tersebut agar (a) cahaya merah tampak pada lapisan dan (b) cahaya merah tersebut hilang pada lapisan ?

**LATIHAN 3.1**

1. Dua celah sempit disinari cahaya monokromatik secara tegak lurus dengan panjang gelombang 800 Å. Pada jarak 100 cm terdapat layar dan terlihat pola interferensi. Jika terjadi garis gelap kedua, maka tentukan beda lintasan cahaya dari kedua celah tersebut !
2. Pada percobaan Young digunakan dua celah sempit yang berjarak 0,3 mm satu dengan lainnya. Jika jarak layar dengan celah 1 m dan jarak garis terang pertama dari pusat 1,5 mm, maka berapakah panjang gelombang cahaya yang digunakan ?
3. Cahaya dengan panjang gelombang 6000 Å datang pada celah kembar Young yang jaraknya 0,2 mm. Pola yang terjadi ditangkap pada layar yang jaraknya 1 m dari celah kembar. Jarak dari terang pusat ke terang yang paling pinggir pada layar = 2,5 cm. Tentukan banyaknya garis terang pada layar !
4. Cahaya monokromatik dilewatkan melalui dua celah sempit yang berjarak 0,5 mm. Pola interferensi akan terlihat pada layar yang berjarak 2 m terhadap celah. Jika panjang gelombang cahaya tersebut 5000 Å, maka berapakah jarak antara dua garis terang yang berurutan ?
5. Suatu celah ganda berjarak celah 5 mm. Dibelakang celah dengan jarak 2 m ditempatkan layar. Celah disinari dengan dua sinar monokromatik dengan panjang gelombang 650 nm dan 550 nm. Hitunglah jarak pola difraksi orde empat kedua sinar di layar !
6. Sebuah sinar monokromatik dengan panjang gelombang 5800 Å didatangkan vertikal pada lapisan minyak yang indeks biasnya = 1,2. Agar terjadi pelemahan sinar maka tentukan tebal minimum lapisan minyak tersebut !

## B. Difraksi Cahaya

Difraksi adalah pelenturan suatu gelombang. Berarti difraksi cahaya dapat didefinisikan sebagai pelenturan cahaya yaitu saat suatu cahaya melalui celah maka cahaya dapat terpecah-pecah menjadi bagian-bagian yang lebih kecil dan memiliki sifat seperti cahaya baru. Sifat-sifat difraksi pada cahaya ini dapat dibuktikan dengan melihat pola interferensi yang terjadi pada layar saat dipasang dibelakang celah. Ada beberapa peristiwa difraksi yang dapat kalian pelajari. Cermati pada penjelasan berikut.

### 1. Celah Tunggal

Cobalah kalian buat suatu celah sempit dan lewatkan sinar monokromatik pada celah itu maka saat dibelakangnya dipasang layar akan tampak pola interferensi pada layar.

Pola interferensi pada difraksi celah tunggal ini terlihat adanya garis-garis gelap. Sedangkan pola terangnya lebar. Terang pusat akan melebar setengah bagian lebih lebar pada kedua sisi. Dari kejadian ini dapat dituliskan syarat-syarat interferensi sebagai berikut.

$$\text{Interferensi maksimum : } D \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

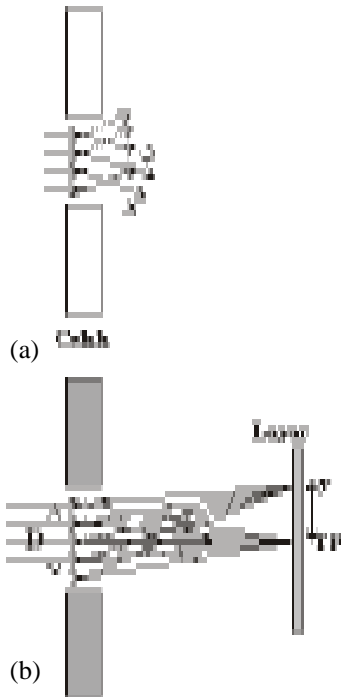
$$\text{Interferensi minimum : } D \sin \theta = m \lambda \quad \dots(3.4)$$

dengan :  $D$  = lebar celah (m)

$\theta$  = sudut berkas sinar dengan arah tegak lurus (derajat)

$\lambda$  = panjang gelombang cahaya (m)

$m$  = 1, 2, 3, 4, ....



**Gambar 3.5**

Pola difraksi pada celah tunggal yang diperbesar

### CONTOH 3.3

Sebuah celah memiliki lebar 0,2 mm disinari cahaya berkas sejajar dengan panjang gelombang 5000Å. Jika sebuah layar ditempatkan 100 cm dibelakang celah, maka tentukan :

- jarak garis gelap ke 1 dari terang pusat,
- lebar terang pusat !

#### Penyelesaian

$$D = 0,2 \text{ mm} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$\lambda = 5000 \text{ Å} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$l = 100 \text{ cm} = 1 \text{ m}$$

- Jarak garis gelap pertama ( $m = 1$ ) dari terang pusat memenuhi:

$$\frac{D y_{G1}}{l} = m \lambda \rightarrow \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot y_{G1}}{1} = 1 \cdot 5 \cdot 10^{-7}$$

$$y_{G1} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$



## b. Lebar terang pusat

Terang pusat dibatasi oleh dua garis gelap pertama (setelah kiri dan kanan) berarti lebar terang pusat tersebut memenuhi :

$$\begin{aligned}\Delta y &= 2 y_{G1} \\ &= 2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}\end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Seberkas cahaya memiliki panjang gelombang 500 nm dilewatkan pada celah sempit. Lebar celahnya  $2 \cdot 10^{-3}$  mm. Cahaya yang terdifraksi oleh celah ditangkap oleh layar yang berada 100 cm di belakang celah. Berapakah:

- jarak antara garis gelap kedua dan ketiga
- jarak garis terang ketiga dari terang pusat dan lebar terang pusat

## 2. Pengaruh difraksi pada perbesaran maksimum alat optik

Sir George Airy (1801 – 1892) adalah seorang astronom Inggris yang telah mempelajari pola cahaya yang melalui suatu bukaan optik (lubang bulat). Pola yang terjadi dinamakan *Cakram Airy*. Airy telah menjelaskan jarak terkecil dua sumber cahaya yang masih bisa dibedakan saat melalui bukaan optik.

Syarat terpisahnya dua titik sumber cahaya yang masih bisa dibedakan harus memenuhi *sudut resolusi minimum*. Menurut Airy, sudut ini memenuhi pola interferensi minimum dengan memenuhi persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}D \sin \theta &= 1,22 \lambda \\ \text{atau } \theta_m &= 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad \dots\dots\dots(3.5) \\ \text{dan } \theta_m &= \frac{y_m}{\ell}\end{aligned}$$

dengan :  $\theta_m$  = sudut resolusi minimum (rad)  
 $\lambda_m$  = panjang gelombang cahaya (m)  
 $D$  = diameter bukaan alat optik (m)  
 $y_m$  = daya urai (m)  
 1,22 = tetapan dari Airy

Untuk lebih memahami tentang sudut resolusi atau daya urai dan Cakram Airy dapat kalian perhatikan contoh berikut.

### CONTOH 3.4

Seberkas cahaya monokromatik dengan panjang gelombang 6600 Å dilewatkan pada sebuah lubang yang memiliki diameter 0,4 mm. Bila jarak lubang ke layar pengamatan 50 cm, maka tentukan sudut resolusi dan daya urai lubang tersebut !



**Gambar 3.6**  
Cakram Airy

**Penyelesaian**

$$D = 0,4 \text{ mm} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$\lambda = 6600 \text{ \AA} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$\ell = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$$

Sudut resolusi lubang memenuhi :

$$\begin{aligned}\theta_m &= 1,22 \frac{\lambda}{D} \\ &= 1,22 \cdot \frac{6,6 \cdot 10^{-7}}{4 \cdot 10^{-4}} \\ &= 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ rad}\end{aligned}$$

Dan daya urai dapat dihitung sebesar :

$$\begin{aligned}\frac{y_m}{\ell} &= \theta_m \\ y_m &= \theta_m \cdot \ell \\ &= 2,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 = 10^{-3} \text{ m}\end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

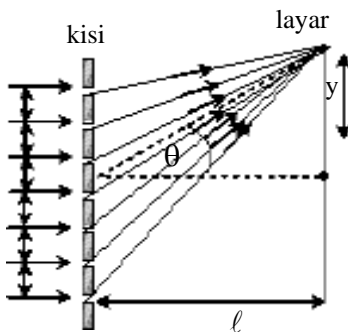
Jarak dua lampu sebuah mobil = 1,22 m. Nyala kedua lampu diamati oleh orang yang diameter pupil matanya 2,2 mm. Kalau panjang gelombang cahaya yang dipancarkan kedua lampu mobil itu rata-rata 5500 Å. Berapakah jarak mobil maksimum supaya nyala lampu itu masih dapat dipisahkan oleh mata ?

**3. Kisi Difraksi**

Sudah tahukan kalian dengan kisi difraksi itu? Kisi difraksi disebut juga celah majemuk yaitu celah-celah sempit yang tertata rapi dengan jarak yang cukup dekat. Pada kisi ini biasanya tertulis data N garis/cm. Dari nilai N ini dapat ditentukan jarak antara celah d dengan hubungan sebagai berikut.

$$d = \frac{1}{N} \dots\dots\dots(3.6)$$

Jika cahaya melawati celah majemuk (kisi) maka cahaya itu akan mengalami difraksi atau pelenturan. Bukti difraksi pada kisi ini dapat dilihat dari pola-pola interferensi yang terjadi pada layar yang dipasang dibelakangnya. Pola interferensi yang dihasilkan memiliki syarat-syarat seperti pada celah ganda percobaan Young. Syarat interferensi tersebut dapat dilihat pada persamaan berikut.



**Gambar 3.7**  
kisi difraksi

$$\text{Interferensi maksimum : } d \sin \theta = m \lambda$$

$$\text{Interferensi minimum : } d \sin \theta = (m - \frac{1}{2}) \lambda \dots\dots\dots(3.7)$$

dengan :  $d$  = jarak antar celah (m)  
 $\theta$  = sudut berkas cahaya terhadap arah tegak lurus  
 $\lambda$  = panjang gelombang sinar (m)  
 $m$  = orde ( $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ )

### CONTOH 3.5

Seberkas cahaya jatuh tegak lurus pada kisi yang terdiri dari 2000 garis tiap cm. Orde terang kedua membentuk sudut  $12^\circ$  terhadap horisontal. Berapakah :

- panjang gelombang cahaya yang digunakan,
- jarak antar pola terang berdekatan jika layar dipasang pada jarak 40 cm di belakang kisi ?

#### Penyelesaian

$$N = 2000 \text{ garis/cm}$$

$$d = \frac{1}{2000} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ cm} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$\theta = 12^\circ, m = 2$$

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

- Orde terang terjadi jika memenuhi persamaan 3.7 sehingga diperoleh :

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

$$5 \cdot 10^{-6} \cdot \sin 12^\circ = 2 \cdot \lambda$$

$$5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,208 = 2 \cdot \lambda$$

$$\lambda = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

- Jarak antara pola terang selalu sama yaitu sama dengan jarak terang pertama dengan terang pusat, sehingga berlaku :

$$\frac{dy}{\ell} = m \lambda$$

$$\frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot y}{10^{-1}} = 1 \cdot 5,2 \cdot 10^{-7}$$

$$\Delta y = 1,04 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 1,04 \text{ cm}$$

### Penting

Interferensi pada layar hasil difraksi oleh kisi sama dengan celah ganda. Pola pusat terjadi pola terang (terang pusat),  $m = 0$  sedangkan garis gelap mulai dari  $m = 1$ . Perbedaan yang terlihat pada pola adalah ketajaman garis terang (intensitas tinggi) karena celah banyak.

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Cahaya dengan panjang gelombang  $6000 \text{ \AA}$  dijatuhkan tegak lurus pada kisi. Jika interferensi maksimum (terang) orde kedua dengan sudut  $15^\circ$  ( $\sin 15^\circ = 0,25$ ), maka tentukan :

- jarak antar pola terang berdekatan,
- jumlah garis per cm pada kisi!



### LATIHAN 3.2

- Seberkas cahaya melewati celah tunggal yang sempit, menghasilkan interferensi minimum orde ketiga dengan sudut deviasi  $30^\circ$ . Cahaya yang dipergunakan mempunyai panjang gelombang  $6000 \text{ \AA}$ . Tentukan
  - lebar celahnya
  - lebar terang pusat jika jarak layarnya  $50 \text{ cm}$ !
- Celah tunggal selebar  $0,1 \text{ mm}$  disinari dengan cahaya berkas sejajar dengan panjang gelombang  $6000 \text{ \AA}$  dan jarak layarnya  $40 \text{ cm}$ . Berapakah jarak antara garis gelap ketiga dengan garis terang pusat pada layar?
- Pada sebuah celah berupa lingkaran dengan diameter  $0,2 \text{ mm}$  dilewatkan seberkas cahaya monokromatik dengan panjang gelombang  $6400 \text{ \AA}$ . Bila jarak celah ke layar pengamatan adalah  $0,5 \text{ m}$ , maka tentukan daya urai dari celah tersebut!
- Dua sumber cahaya ( $\lambda = 7200 \text{ \AA}$ ) terpisah pada jarak  $1,318 \text{ mm}$ . Pada saat mata melihat benda tersebut, mata berakomodasi menebal hingga berdiameter  $0,4 \text{ mm}$ . Berapakah jarak terjauh sumber ke mata sehingga obyek tersebut masih dapat terpisah dengan jelas?
- Sebuah kisi memiliki  $3000$  garis tiap  $\text{cm}$  kita gunakan untuk menentukan panjang gelombang cahaya. Sudut antara garis pusat dan garis pada orde I adalah  $8^\circ$  ( $\sin 8^\circ = 0,140$ ). Dari hasil di atas, tentukan panjang gelombang cahaya itu!
- Seberkas sinar monokromatik dengan panjang gelombang  $5 \times 10^{-7} \text{ m}$  datang tegak lurus pada kisi. Jika spektrum orde kedua membuat sudut  $30^\circ$  dengan garis normal pada kisi, maka berapakah jumlah garis per  $\text{cm}$  kisi yang digunakan?

## C. Polarisasi Cahaya

Apakah polarisasi itu? Polarisasi dapat didefinisikan sebagai pengurangan intensitas karena berkurangnya komponen-komponen gelombangnya. Cahaya termasuk gelombang transversal yang memiliki komponen-komponen yang saling tegak lurus. Komponen-komponen inilah yang dapat hilang saat terjadi polarisasi. Polarisasi cahaya ini dapat disebabkan oleh beberapa macam diantaranya seperti penjelasan berikut.

### 1. Pemantulan dan Pembiasan

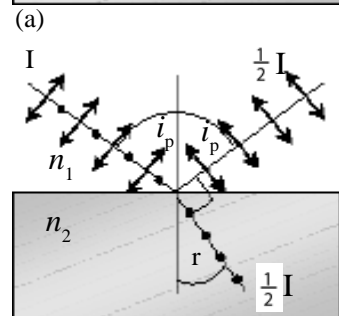
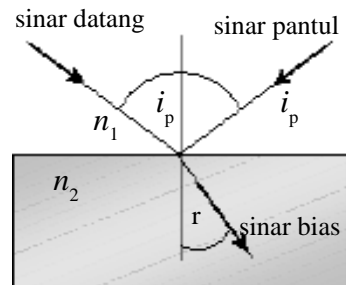
Cahaya datang dan mengenai batas medium akan mengalami pemantulan dan pembiasan seperti *Gambar 3.8(a)*. Perubahan sudut datang akan merubah sudut pantul  $i$  dan sudut bias  $r$ . Pada suatu saat sinar pantul dan sinar bias akan saling tegak lurus. Saat terjadi keadaan seperti inilah akan terjadi pembagian intensitas pada kedua sinar itu,  $\frac{1}{2} I$  untuk sinar bias dan  $\frac{1}{2} I$  untuk sinar pantul sehingga sinarnya mengalami polarisasi, lihat *Gambar 3.8(b)*.

Pada polarisasi linier ini akan berlaku hubungan-hubungan seperti di bawah.

$$i_p + r = 90^\circ$$

$$\text{tg } i_p = \frac{n_2}{n_1}$$

.....(3.8)



**Gambar 3.8**  
Polarisasi pembiasan dan pemantulan

Persamaan 3.8 inilah yang dikenal sebagai *hukum Brewster* sesuai nama ilmuwan yang pertama kali mempelajarinya, *Daved Brewster* (1781-1868).

### CONTOH 3.6

Dalam sebuah bejana diisi air yang indeks biasnya 1,33. Jika cahaya monokromatik dari air diarahkan ke udara maka berapakah sudut yang harus diberikan pada cahaya agar terjadi polarisasi?

#### Penyelesaian

$$n_u = 1$$

$$n_a = 1,33$$

Sudut yang harus diberikan pada cahaya adalah  $i_p$  dan besarnya memenuhi hukum *Brewster*.

$$\operatorname{tg} i_p = \frac{n_a}{n_u}$$

$$\operatorname{tg} i_p = \frac{1}{1,33} = \frac{3}{4}$$

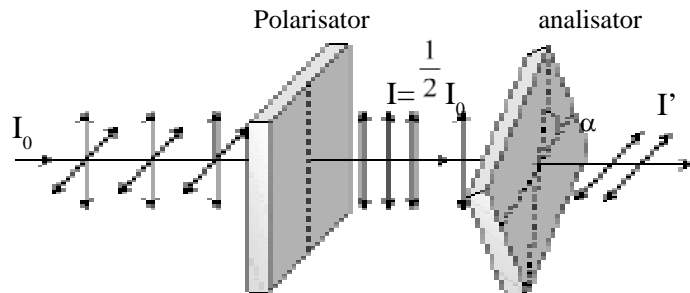
$$i_p = 37^\circ$$

*Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.*

Seberkas cahaya dari udara didatangkan pada kaca dengan sudut datang  $45^\circ$ . Ternyata cahaya tersebut terpolarisasi linear, berapakah indeks bias kaca tersebut?

## 2. Absorpsi Selektif

Absorpsi selektif adalah penyerapan intensitas cahaya karena penyerapan yang terseleksi yaitu penyerapan komponen-komponen cahaya tertentu. Bahan yang dapat menyerap secara selektif ini dinamakan *polarisator*. Perhatikan *Gambar 3.9*.



**Gambar 3.9**  
Polarisasi absorpsi selektif

Cahaya yang terpolarisasi intensitasnya menjadi  $I = \frac{1}{2} I_0$ . Bagaimana jika cahaya terpolarisasi tersebut dilewatkan pada bahan polarisator lain dengan membentuk sudut  $\alpha$  terhadap polarisator pertama? Secara eksperimen dapat diperoleh hubungan seperti persamaan berikut.

$$I' = I \cos^2 \alpha$$

$$\text{atau } I' = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha \dots\dots\dots(3.9)$$

dengan :  $I_0$  = Intensitas cahaya awal  
 $I$  = Intensitas cahaya terpolarisasi  
 $I'$  = Intensitas cahaya setelah melalui dua bahan polarisator  
 $\alpha$  = sudut antara kedua polarisator

Persamaan 3.9 inilah yang kemudian dikenal sebagai *hukum Mallus*.

### CONTOH 3.7

Seberkas cahaya memiliki intensitas 36 wat/m<sup>2</sup> dilewatkan pada dua polarisator. Jika kedua polarisator dipasang sehingga sumbu transmisinya membentuk sudut 60° maka tentukanlah intensitas cahaya yang keluar dari kedua polarisator tersebut!

#### Penyelesaian

$$I = 36 \text{ wat/m}^2$$

$$\alpha = 60^\circ$$

Sesuai persamaan 3.9, intensitas cahaya yang keluar dari kedua polaroid di atas dapat diperoleh :

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{1}{2} I \cos^2 \alpha \\ &= \frac{1}{2} \cdot 36 \left( \frac{1}{2} \right)^2 = 4,5 \text{ watt/m}^2 \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Dua buah kristal dipasang membutuhkan sudut 45° satu sama lain. Cahaya tak terpolarisasi dengan intensitas 16 watt/m<sup>2</sup> dilewatkan pada kedua kristal tersebut. Berapakah intensitas yang keluar dari kedua kristal ?



### LATIHAN 3.3

1. Coba kalian tentukan syarat-syarat agar cahaya tak terpolarisasi akan mengalami polarisasi saat melalui batas medium udara kaca !
2. Suatu cahaya dari udara menuju air ( $n_a = 4/3$ ). Supaya cahaya mengalami polarisasi linier, maka tentukan :
  - a. sudut datangnya,
  - b. sudut biasnya !
3. Jelaskan apa yang dimaksud dengan absorpsi selektif ? Apakah gejala yang akan terjadi akibat absorpsi selektif itu?
4. Dua buah kristal tourmalin, satu sama lain bersilangan dengan sudut 30°. Intensitas cahaya mula-mula yang mengenai kristal pertama 15 watt/m<sup>2</sup>. Berapakah intensitas cahaya yang dapat dilewatkan oleh kedua kristal tadi ?

## Rangkuman Bab 3

1. Interferensi adalah gabungan dua cahaya atau lebih.
  - a. celah ganda : percobaan Young  
 Interferensi maksimum :  $d \sin \theta = m \lambda$   
 Interferensi minimum :  $d \sin \theta = (m - \frac{1}{2}) \lambda$   
 $d \sin \theta = \frac{\Delta x}{\ell}$
  - b. lapisan tipis :  
 interferensi maksimum :  $2 d \sin \theta = (m + \frac{1}{2}) \lambda$   
 interferensi minimum :  $2 d \sin \theta = m \lambda$
2. Difraksi adalah pelenturan cahaya.
  - a. celah tunggal  
 interferensi maksimum :  $D \sin \theta = (m + \frac{1}{2}) \lambda$   
 interferensi minimum :  $D \sin \theta = m \lambda$
  - b. daya urai  
 $y_m = 1,22 \frac{\lambda \ell}{D}$
  - c. kisi difraksi memilih syarat sama dengan percobaan Young.
3. Polarisasi adalah pengurangan komponen cahaya..
  - a. karena pembiasan dan pemantulan dapat terjadi dengan syarat:  
 $i_p + r = 90^\circ$  dan  
 $\tan i_p = \frac{n_2}{n_1}$
  - b. absorpsi selektif : hukum Mallus  
 $I = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha$

## Evaluasi Bab 3

*Pilihlah jawaban yang benar pada soal – soal berikut dan kerjakan di buku tugas kalian.*

- Pada percobaan Young (celah ganda), jika jarak antara dua celahnya dijadikan dua kali semula, maka jarak antara dua garis gelap yang berurutan menjadi ....

  - 4 kali semula
  - 2 kali semula
  - $\frac{1}{2}$  kali semula
  - $\frac{1}{4}$  kali semula
  - tetap tidak berubah
- Dua celah sempit yang terpisah pada jarak 0,2 mm disinari tegak lurus. Garis terang ketiga terletak 7,5 mm dari garis terang ke-nol pada layar yang jaraknya 1 m dari celah. Panjang gelombang sinar yang dipakai adalah ....

  - $2,5 \times 10^{-4}$  mm
  - $5,0 \times 10$  mm
  - $1,5 \times 10$  mm
  - $2,5 \times 10^{-3}$  mm
  - $5,0 \times 10$  mm
- Dalam melakukan percobaan Young, untuk memperkecil jarak dua garis terang yang berdekatan dapat dilakukan dengan cara :

  - (1) memperbesar jarak antar dua celah
  - (2) memperbanyak orde garis terang
  - (3) mengganti cahaya yang panjang gelombangnya lebih kecil
  - (4) menjauhkan layar dari celah
  - jika 1, 2, 3 dan 4 benar
  - jika 1, 2, 3 benar
  - jika 1 dan 3 benar
  - jika 2 dan 4 benar
  - jika 4 benar
- Pada percobaan Young, dua celah berjarak 1 mm diletakkan pada jarak 1 meter dari sebuah layar. Bila jarak terdekat antara pola interferensi garis terang pertama dan garis terang kesebelas adalah 4 mm, maka panjang gelombang cahaya yang menyinari adalah ....

  - 1000 Å
  - 2000 Å
  - 3500 Å
  - 4000 Å
  - 5000 Å
- Cahaya dengan panjang gelombang  $5 \times 10^{-7}$  m datang pada celah kembar Young yang jaraknya  $2 \times 10^{-4}$  m. Pola yang terjadi ditangkap pada layar yang berada 1 meter dari celah kembar. Jarak antara dua buah garis terang ... cm

  - 0,10
  - 0,25
  - 0,50
  - 1,00
  - 2,50
- Bila cahaya matahari mengenai suatu lapisan tipis minyak yang ada di atas permukaan air, maka warna-warna yang terlihat timbul karena ....

  - difraksi
  - refraksi
  - interferensi
  - polarisasi
  - refleksi
- Sebuah sinar monokromatik dengan panjang gelombang 6000 Å didatangkan vertikal pada selaput minyak yang indeks biasnya = 1,2. Agar terjadi pelemahan sinar tebal minimum lapisan minyak tersebut adalah ....

  - 15 x 10 cm
  - 25 x 10 cm
  - 25 x 10 cm
  - 25 x 10 cm
  - 25 x 10 cm
- Suatu berkas sinar sejajar mengenai tegak lurus suatu celah yang lebarnya 0,4 mm. Di belakang celah diberi lensa positif dengan jarak titik api 40 cm. Garis terang pusat (orde nol) dengan garis gelap pertama pada layar di bidang titik api lensa berjarak 0,56 mm. Panjang gelombang sinar adalah ....

  - $6,4 \times 10$  m
  - $5,6 \times 10$  m
  - $4,0 \times 10$  m
  - $1,6 \times 10$  m
  - $11,2 \times 10$  m



9. Seseorang bermata normal (titik dekatnya 25 cm) mengamati benda dengan mata berakomodasi maksimum. Diameter pupil matanya 2 mm dan mata peka terhadap cahaya  $550 \cdot 10^{-6}$  mm. Batas daya urai mata orang itu adalah ....
- A. 0,01 mm                      D. 1 mm  
B. 0,08 mm                      E. 2 mm  
C. 0,2 mm
10. Jarak dua lampu adalah 122 cm. Diameter pupil mata 1,5 mm dan panjang gelombang cahaya lampu 3000 Å. Jarak lampu tersebut ke pengamat yang paling jauh supaya lampu masih dapat dilihat terpisah adalah ....
- A. 2000 m                      D. 4000 m  
B. 2500 m                      E. 5000 m  
C. 3500 m
11. Dengan menggunakan kisi difraksi, kita ingin mempelajari suatu spektrum cahaya matahari. Yang mana diantara warna-warna cahaya berikut yang paling lemah dilenturkan ....
- A. biru                      D. kuning  
B. violet                      E. merah  
C. hijau
12. Sebuah kisi yang mempunyai 2 x 10 garis/cm menerima seberkas sinar monokromatis. Sudut deviasi garis terang pertama yang dipakai  $30^\circ$ . Panjang gelombang sinar monokromatis yang digunakan ....
- A. 1000 nm                      D.  $250\sqrt{3}$  nm  
B. 750 nm                      E. 250 nm  
C. 500 nm
13. Cahaya merupakan gelombang transversal. Hal ini dibuktikan berdasarkan percobaan yang menunjukkan adanya ....
- A. difraksi                      D. refraksi  
B. polarisasi                      E. refleksi  
C. interferensi
14. Jika terjadi polarisasi pada pemantulan sinar oleh suatu permukaan batas medium tembus cahaya, maka ...
- (1) sudut antara berkas sinar jatuh dan berkas sinar pantul  $90^\circ$   
(2) sudut pantul  $57^\circ$   
(3) sinar sudut jatuh adalah kebalikan dari indeks bias  
(4) sudut antara berkas sinar pantul dan sinar bias  $90^\circ$
- Yang benar adalah ....
- A. semua                      D. 2 dan 4  
B. 1, 2, dan 3                      E. 4 saja  
C. 1 dan 3
15. Dua buah kristal tourmalin, satu sama lain bersilangan dengan sudut  $60^\circ$ . Intensitas cahaya mula-mula yang mengenai kristal I adalah 20 watt/m. maka intensitas cahaya yang keluar dari kristal II adalah ...
- A. 10 watt/m  
B.  $10\sqrt{3}$  watt/m  
C. 5 watt/m  
D.  $5\sqrt{3}$  watt/m  
E. 2,5 watt/m
-

**B A B**

**4**

# **LISTRIK STATIS**



*Sumber: [www.angkasa-online.com](http://www.angkasa-online.com)*

Kalian tentu tidak asing dengan petir. Kejadiannya saat mendengar waktu hujan, cukup menakutkan. Petir inilah contoh dari kejadian listrik statis. Ada muatan-muatan yang bergerak pada saat itu dan memunculkan cahaya yang disebut kilat. Apa sebenarnya muatan itu, apa yang terjadi diantara muatan? Mengapa bisa bergerak bagaimana besaran-besaran yang dimiliki.

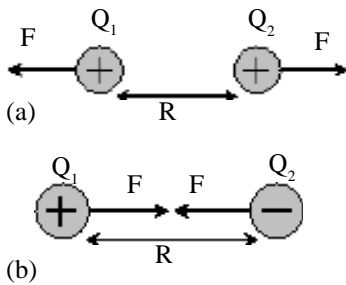
Semua hal di atas itulah yang dapat kalian pelajari pada bab ini. Oleh sebab itu setelah belajar bab ini diharapkan kalian dapat :

1. menerapkan hukum Coulomb pada permasalahan gaya dan medan listrik,
2. menentukan potensial dan energi potensial yang dimiliki suatu muatan,
3. menerapkan hukum Gauss pada bab induktor dan keping sejajar,
4. menerapkan hukum-hukum listrik statis pada kapasitor.

## A. Hukum Coulomb

### 1. Gaya Coulomb

Kalian tentu sudah mengenal ada proton dan elektron. Proton bermuatan positif dan elektron bermuatan negatif. Jika sebuah benda mengandung lebih banyak proton karena kehilangan elektronnya maka benda tersebut akan bermuatan positif. Begitu pula sebaliknya benda akan bermuatan negatif jika menangkap elektron sehingga kelebihan elektron. Apa yang terjadi jika benda-benda bermuatan itu didekatkan? Kejadian inilah yang telah dijawab oleh coulomb.



**Gambar 4.1**

(a) muatan sejenis tolak menolak (b) muatan tak sejenis tarik menarik.

Menurut Coulomb, dua muatan yang didekatkan akan bekerja gaya tarik atau gaya tolak yang besarnya sebanding dengan perkalian kedua muatannya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya. Dari penjelasan ini dapat dirumuskan seperti berikut.

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{R^2} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

dengan :  $F$  = gaya tarik / tolak (N)  
 $Q_1, Q_2$  = muatan listrik (coulomb)  
 $R$  = jarak antara dua muatan (m)  
 $k$  =  $9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

Persamaan 4.1 inilah yang kemudian dikenal sebagai *hukum Coulomb*.

Sama dengan jenis gaya yang lain, gaya elektrostatik atau gaya Coulomb juga merupakan besaran vektor. Besarnya sesuai dengan persamaan 4.1 dan arahnya sesuai pada *Gambar 4.1*.

### CONTOH 4.1

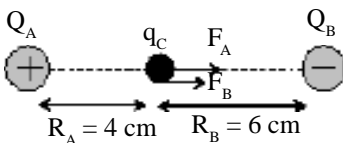
Dua muatan A dan B berjarak 10 cm satu dengan yang lain.  $Q_A = +16 \mu\text{C}$  dan  $Q_B = -18 \mu\text{C}$ . Jika muatan  $q_C = 2 \mu\text{C}$  diletakkan diantara A dan B berjarak 4 cm dari A maka tentukan gaya yang dimuat muatan  $q_C$ !

#### Penyelesaian

$$\begin{aligned} Q_A &= +16 \mu\text{C} = 16 \cdot 10^{-6} \text{ C} \\ Q_B &= -18 \mu\text{C} = -18 \cdot 10^{-6} \text{ C} \\ q_C &= 2 \mu\text{C} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C} \end{aligned}$$

Posisi muatan  $q_C$  dan gaya yang bekerja dapat digambarkan seperti pada *Gambar 4.2*.  $q_C$  tertolak A ( $F_A$ ) dan tertarik B ( $F_B$ ). Karena arahnya sama maka berlaku :

$$F_C = F_A + F_B$$



**Gambar 4.2**

Gaya yang bekerja pada  $q_C$

$$\begin{aligned}
 &= k \frac{q_C Q_A}{R_A^2} + k \frac{q_C Q_B}{R_B^2} \\
 &= k q_C \left( \frac{Q_A}{R_A^2} + \frac{Q_B}{R_B^2} \right) \\
 &= 9 \cdot 10^9 \cdot (2 \cdot 10^{-6}) \left( \frac{16 \cdot 10^{-6}}{(4 \cdot 10^{-2})^2} + \frac{18 \cdot 10^{-6}}{(6 \cdot 10^{-2})^2} \right) \\
 &= 18 \cdot 10^3 (10^{-2} + \frac{1}{2} \cdot 10^{-2}) \\
 &= 270 \text{ N}
 \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Muatan  $Q_A = -40 \mu\text{C}$  dan  $Q_B = +180 \mu\text{C}$  berjarak 50 cm. Muatan  $Q_C = -10 \mu\text{C}$  ditempatkan segaris AB berjarak 20 cm dari A. Tentukan gaya yang diambil muatan  $Q_C$ !

Vektor gaya elektrostatik ini akan lebih dipahami lagi pada muatan-muatan yang tidak segaris. Jika sebuah muatan dipengaruhi beberapa gaya tidak segaris, tentu kalian sudah bisa menganalisisnya, resultan gaya yang dirasakan muatan tersebut dapat ditentukan dengan metode jajargenjang, analisis atau poligon.

Perhatikan contoh berikut.

#### CONTOH 4.2

Tiga muatan  $q_A = 4 \mu\text{C}$ ,  $q_B = -\mu\text{C}$  dan  $q_C = +2 \mu\text{C}$  ditempatkan pada segitiga sama sisi seperti pada Gambar 4.3 (a). Tentukan gaya yang dirasakan muatan  $q_C$ !

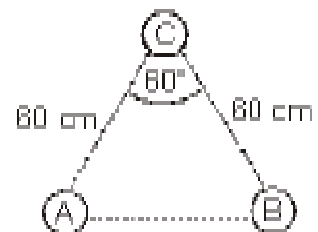
##### Penyelesaian

Muatan C dipengaruhi dua gaya  $F_{AC}$  tolak menolak (muatan sejenis) dan  $F_{BC}$  tarik menarik (muatan berlainan jenis). Besar kedua gaya itu memenuhi :

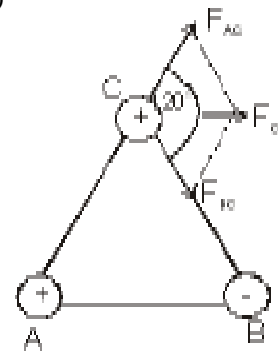
$$\begin{aligned}
 F_{AC} &= k \frac{q_A q_C}{R_{AC}^2} \\
 &= 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{(0,6)^2} = 0,2 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Besar  $q_B$  sama dengan  $q_A$  dan jaraknya ke  $q_C$  juga sama berarti besar gaya yang dirasakan sama. Jenis berbeda akan mempengaruhi arahnya.

Berarti  $F_{BC} = F_{AC} = 0,2 \text{ N}$ .



(a)



(a)

**Gambar 4.3**

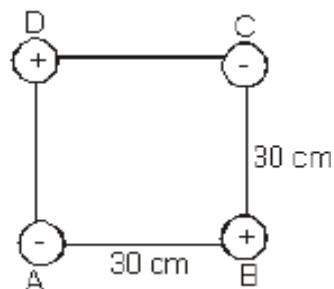
$F_{BC}$  dan  $F_{AC}$  membentuk sudut  $120^\circ$  maka resultannya dapat menggunakan metode jajar genjang seperti pada *Gambar 4.3 (b)*.

$$\begin{aligned} F_C^2 &= F_{AC}^2 + F_{BC}^2 + 2F_{AC} \cdot F_{BC} \cos 120^\circ \\ &= 0,22 + 0,22 + 2 \cdot 0,2 \cdot 0,2 \left(-\frac{1}{2}\right) \\ &= 0,04 + 0,04 - 0,04 \\ &= 0,04 \end{aligned}$$

Jadi  $F_C = \sqrt{0,04} = 0,2 \text{ N}$ .

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Empat muatan titik  $q_A = q_C = -2\mu\text{C}$  dan  $q_B = q_D = +2\mu\text{C}$  ditempatkan di titik sudut persegi yang sisinya 30 cm seperti pada *Gambar 4.4*. Tentukan gaya yang dirasakan muatan  $q_A$ !



**Gambar 4.4**

## Kegiatan 4.1

### Titik Keseimbangan

**Tujuan** : Menentukan letak titik yang tidak dipengaruhi gaya.

**Persoalan** : Dua muatan  $q_A = -4 \mu\text{C}$  dan  $q_B = +9 \mu\text{C}$  terpisah pada jarak 20 cm. Tentukan letak titik  $q_C = +2 \mu\text{C}$  agar tidak dipengaruhi gaya dari resultan  $q_A$  dan  $q_B$ !

**Kegiatan** :

1. Gambarlah muatan titik  $q_A$  dan  $q_B$ .
2. Letakkan muatan  $q_C$  pada posisi segaris dengan  $q_A$  dan  $q_B$ . Tentukan beberapa alternatif diantara dan di luar kedua muatan (dekat  $q_A$  dan dekat  $q_B$ )
3. Gambarkan arah gaya yang dirasakan muatan  $q_C$  pada setiap alternatifnya. Tempat yang dimungkinkan memiliki resultan nol adalah tempat yang arah gayanya berkebalikan.

4. Tentukan jarak titik yang tidak dipengaruhi gaya dengan menggunakan konsep  $F_{AC} = F_{BC}$ .

### Tugas

Buatlah simpulan.

## 2. Kuat Medan Listrik

Jika ada muatan  $q$  yang berada di sekitar muatan lain  $Q$  maka muatan  $q$  akan merasakan gaya Coulomb dari  $Q$ . Daerah yang masih merasakan pengaruh gaya Coulomb ini dinamakan *medan listrik*. Medan listrik ini didefinisikan sebagai gaya yang dirasakan oleh muatan uji positif 1 C. Karena gaya adalah besaran vektor maka medan listrik juga besaran vektor. Arahnya dapat ditentukan seperti pada *Gambar 4.5*.

Sedangkan besar medan listrik dinamakan kuat medan listrik dirumuskan seperti berikut.

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

atau  $E = k \frac{Q}{R^2}$  ..... (4.2)

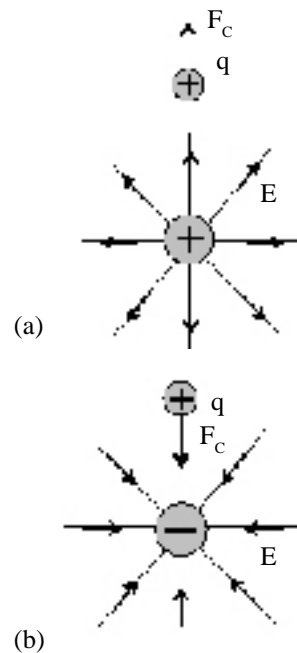
dengan :  $E$  = kuat medan listrik (N/C)

$Q$  = muatan listrik (coulomb)

$R$  = jarak titik dari muatan (m)

$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

Untuk lebih memahami tentang medan listrik ini dapat kalian perhatikan contoh di bawah. Yang perlu diperhatikan adalah besaran medan listrik memiliki kesamaan dengan gaya Coulomb.

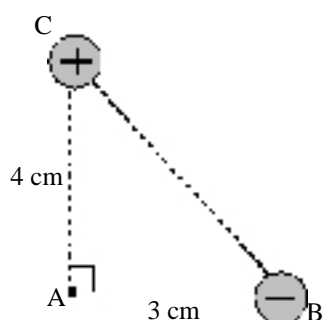


**Gambar 4.5**

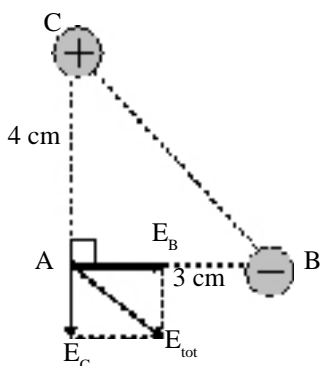
Listrik di sekitar muatan :  
(a) positif dan (b) negatif.

### CONTOH 4.3

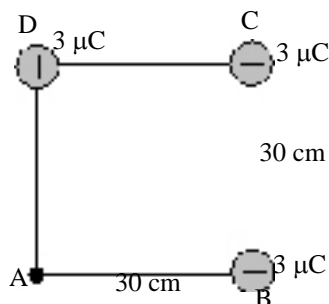
Dua muatan  $q_B = 12 \mu\text{C}$  dan  $q_C = 9 \mu\text{C}$  ditempatkan di titik-titik sudut segitiga siku-siku seperti pada *Gambar 4.6*. Tentukan kuat medan listrik yang dirasakan di titik A!



Gambar 4.6



Gambar 4.7



Gambar 4.8

**Penyelesaian**

$$q_B = 12 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

$$R_B = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$q_C = 9 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

$$R_C = 4 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Di titik A dipengaruhi dua medan listrik yaitu dari B dan C. Arahnya dapat digambarkan seperti pada Gambar 4.7.

$$\begin{aligned} E_B &= \frac{q_B}{R_B^2} \\ &= 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{12 \cdot 10^{-6}}{(3 \cdot 10^{-2})^2} = 12 \cdot 10^7 \text{ N/C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_C &= \frac{q_C}{R_C^2} \\ &= 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{9 \cdot 10^{-6}}{(4 \cdot 10^{-2})^2} = 5 \cdot 10^7 \text{ N/C} \end{aligned}$$

$E_B$  dan  $E_C$  saling tegak lurus berarti memenuhi dalil Pythagoras :

$$\begin{aligned} E_{\text{tot}} &= \sqrt{E_B^2 + E_C^2} \\ &= \sqrt{(12 \cdot 10^7)^2 + (5 \cdot 10^7)^2} = 13 \cdot 10^7 \text{ N/C} \end{aligned}$$

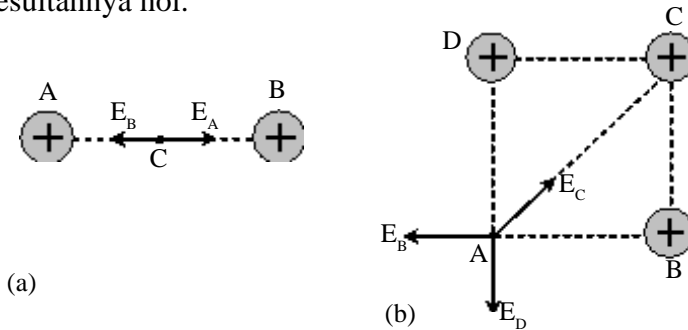
**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Tiga muatan sama besar  $q = 3 \mu\text{C}$  ditempatkan pada titik-titik sudut bujur sangkar seperti pada Gambar 4.8. Sisi bujur sangkar 30 cm. Tentukan kuat medan listrik yang dirasakan di titik A

**3. Kuat Medan Listrik yang nol**

Jika ada dua muatan atau lebih maka setiap titik yang ada di sekitarnya akan dipengaruhi oleh medan listrik sejumlah muatannya tersebut. Karena medan listrik merupakan besaran vektor maka ada kemungkinan resultannya nol. Coba perhatikan contohnya pada Gambar 4.9. Pada bagian (a)

ada dua medan listrik, jika  $F_A = F_B$  maka kuat medan di titik C dapat nol. Tiga medan listrik yang memungkinkan resultannya nol.



**Gambar 4.9**

Kemungkinan kuat medan nol.

Untuk lebih memahami konsep di atas dapat kalian cermati contoh berikut.

#### CONTOH 4.4

Muatan A  $9 \mu\text{C}$  dan muatan B  $16 \mu\text{C}$  berjarak 14 cm satu dengan yang lain. Tentukan :

- letak titik C yang memiliki kuat medan nol
- gaya yang dirasakan muatan  $q = 2 \mu\text{C}$  yang diletakkan di titik C tersebut.

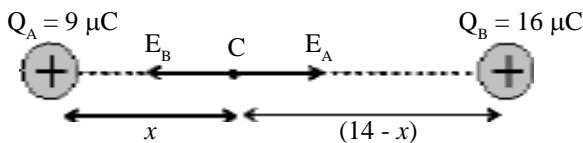
#### Penyelesaian

$$Q_A = 9 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

$$Q_B = 16 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

$$R = 14 \text{ cm}$$

- Letak titik C yang kuat medan listriknya nol dapat digambarkan seperti pada *Gambar 4.10*.



**Gambar 4.10**

Titik yang kuat medannya nol.

Dari *Gambar 4.10* tersebut dapat diperoleh bahwa untuk kuat medan listrik di C nol maka harus memenuhi :

$$\begin{aligned} F &= E \\ \frac{Q_A}{R_A^2} &= \frac{Q_B}{R_B^2} \\ \frac{9 \cdot 10^{-6}}{x^2} &= \frac{16 \cdot 10^{-6}}{(14 - x)^2} \end{aligned}$$

Kedua ruas dibagi  $10^{-6}$  dan diakarkan sehingga diperoleh :



$$\begin{aligned}\frac{3}{x} &= \frac{4}{(14-x)} \\ 3(14-x) &= 4x \\ 42 &= 7x \\ x &= 6 \text{ cm}\end{aligned}$$

Jadi titik C berjarak 6 cm dari  $Q_A$  atau 8 cm dari  $Q_B$ .

- b. Karena di titik C,  $E_C = 0$  maka gaya yang dirasakan  $q = 2 \mu\text{C}$  sebesar :

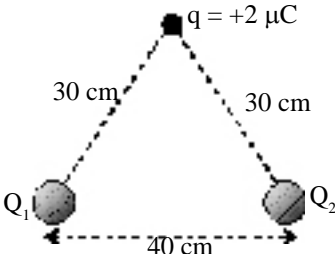
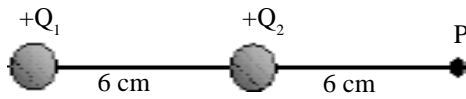
$$\begin{aligned}F &= q E_C \\ &= 2 \cdot 10^{-6} \cdot 0 = 0\end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Dua muatan  $Q_A = 8 \mu\text{C}$  dan  $Q_B = 2 \mu\text{C}$  ditempatkan pada jarak 15 cm. Dimanakah muatan  $q_C = -2 \mu\text{C}$  harus ditempatkan agar gaya yang dirasakan sama dengan nol.



## LATIHAN 1

- Dua muatan titik  $Q_A = 4 \cdot 10^{-8} \text{ C}$  dan  $Q_B = -2 \cdot 10^{-8} \text{ mC}$  berjarak 30 cm satu dengan yang lain. Jika  $k = 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ , maka tentukan gaya elektrostatis yang dialami kedua muatan itu !
- Menurut model atom Bohr tentang atom hidrogen, elektron ( $q = -e$ ) mengelilingi proton ( $q' = e$ ) dengan jari-jari  $5,3 \cdot 10^{-11}$  meter. Jika  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  maka tentukan besar gaya tarik-menarik antara proton dan elektron !
- Tiga muatan diletakkan pada sisi-sisi segitiga seperti gambar di bawah.  
  
 $Q_1 = +4 \mu\text{C}$  dan  $Q_2 = -4 \mu\text{C}$ . Berapakah besar gaya yang dirasakan muatan q ?
- Perhatikan gambar di bawah. Jika diketahui  $Q_1 = Q_2 = 10 \mu\text{C}$  dan konstanta  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ , maka tentukan besar dan arah kuat medan di titik P !  

- Dua buah partikel A dan B masing-masing bermuatan  $+18 \mu\text{C}$  dan  $+8 \mu\text{C}$  terpisah dengan jarak 30 cm. Jika C adalah titik yang terletak diantara A dan B sedemikian sehingga kuat medan di C sama dengan nol, maka tentukan letak C !
- Dua muatan A dan B masing-masing sebesar  $+4 \mu\text{C}$  dan  $-16 \mu\text{C}$  terpisah dengan jarak 12 cm. Jika C adalah titik sedemikian kuat medannya sama dengan nol, maka tentukan letak C !
- Coba jelaskan bagaimanakah pengaruh jenis muatan terhadap besarnya gaya Coulomb dan kuat medan listrik!

## B. Potensial dan Energi Potensial Listrik

### 1. Energi Potensial

Setiap ada medan gaya maka akan melibatkan usaha dan energi. Usaha merupakan perubahan energi potensial.

$$W = \Delta E_p \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

Sedangkan usaha sendiri didefinisikan sebagai perkalian titik vektor  $F$  dan  $R$ .

$$dW = -F \cdot dR$$

$$\int dW = - \int_{R_1}^{R_2} k \frac{Q_1 Q_2}{R^2} dR$$

$$W = k Q_1 Q_2 \left[ \frac{1}{R} \right]_{R_1}^{R_2}$$

$$= k Q_1 Q_2 \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) = k \frac{Q_1 Q_2}{R_2} - k \frac{Q_1 Q_2}{R_1}$$

Dengan menggunakan konsep :  $W = E_{p2} - E_{p1}$  maka diperoleh perumusan energi potensial listrik seperti berikut.

$$E_p = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{R} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

dengan :  $E_p$  = energi potensial listrik (joule)

$Q_1, Q_2$  = muatan listrik (coulomb atau C)

$R$  = jarak dua muatan

Energi potensial listrik merupakan besaran skalar berarti tidak memiliki arah. Coba perhatikan contoh berikut.

#### CONTOH 4.5

Pada titik A dan B dari titik sudut segitiga terdapat muatan  $Q_A = 8 \mu C = 8 \cdot 10^{-6} C$  dan  $Q_B = -6 \mu C = -6 \cdot 10^{-6} C$  seperti pada Gambar 4.11. Jika terdapat muatan lain sebesar  $q = 2 \mu C$  maka tentukan :

- energi potensial muatan  $q$  itu jika berada di titik C,
- energi potensial muatan  $q$  itu jika di titik D,
- usaha untuk memindahkan muatan  $q$  dari C ke D !

#### Penyelesaian

$$Q_A = 8 \mu C = 8 \cdot 10^{-6} C$$

$$Q_B = -6 \mu C = -6 \cdot 10^{-6} C$$

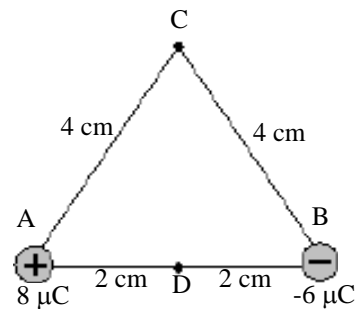
$$q = 2 \mu C = 2 \cdot 10^{-6} C$$

a. Di titik C :

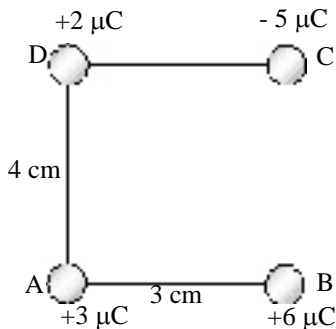
$$R_{AC} = R_{BC} = 4 \cdot 10^{-2} m$$

$$E_{PC} = E_{PA} + E_{PB}$$

$$= k \frac{Q_A q}{R_{AC}} + k \frac{Q_B q}{R_{BC}} = k \frac{q}{R_{AC}} (Q_A + Q_B)$$



Gambar 4.11



Gambar 4.12

### Penting

Kalian telah belajar beberapa besaran,  $\vec{F}_C$  dan  $\vec{E}$  yang merupakan besaran vektor dan  $E_p$  dan  $V$  yang merupakan besaran skalar.

Perbedaan penyelesaian tentang vektor dan skalar dapat kalian perhatikan pada tiap contoh soalnya.

$$= \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{(4 \cdot 10^{-2})} (8 \cdot 10^{-6} - 6 \cdot 10^{-6}) = 0,9 \text{ joule}$$

b. Di titik D :

$$R_{AD} = R_{BD} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$E_{PD} = E_{PA} + E_{PB}$$

$$= k \frac{Q_A q}{R_{AD}} + k \frac{Q_B q}{R_{BD}}$$

$$= k \frac{q}{R_{AD}} (Q_A + Q_B)$$

$$= \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{(2 \cdot 10^{-2})} (8 \cdot 10^{-6} - 6 \cdot 10^{-6})$$

$$= 1,8 \text{ joule}$$

c. Usaha yang dilakukan :

$$W = \Delta E_p = E_{PD} - E_{PC} = 1,8 - 0,9 = 0,9 \text{ joule}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Empat muatan benda di titik-titik sudut persegi panjang seperti Gambar 4.12. Tentukan usaha yang diperlukan untuk memindahkan muatan A ke titik jauh tak hingga.

## 2. Potensial Listrik

Kalian mungkin sudah sering mendengar tentang beda potensial, terutama pada bab listrik dinamis. Beda potensial ini disebut juga tegangan. Apa sebenarnya potensial listrik itu? Potensial listrik didefinisikan sebagai besarnya energi potensial yang dimiliki muatan 1 Coulomb. Dari definisi ini, potensial listrik dapat dirumuskan sebagai berikut.

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

$$V = \frac{k \frac{Q_1 Q_2}{R}}{Q}$$

$$V = k \frac{Q}{R} \dots\dots\dots (4.5)$$

dengan :  $V$  = potensial listrik (volt)

$Q$  = muatan listrik (C)

$R$  = jarak titik dari muatan (m)

Potensial listrik juga termasuk besaran skalar seperti energi potensial listrik, berarti tidak memiliki arah dan jenis muatannya akan mempengaruhi besarnya.

### CONTOH 4.6

Dua muatan titik  $Q_A = -4 \mu\text{C}$  dan  $Q_B = +8 \mu\text{C}$  berjarak 16 cm. Tentukan potensial listrik di suatu titik yang berada di tengah-tengah kedua muatan itu!

#### Penyelesaian

$$Q_A = -4 \mu\text{C}$$

$$Q_B = +8 \mu\text{C}$$

$$R_A = R_B = 8 \text{ cm} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

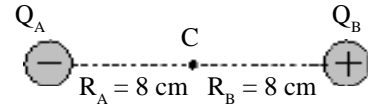
Titik C berada di tengah-tengah seperti diperlihatkan pada *Gambar 4.13*. karena besaran skalar maka potensial di titik C tersebut memenuhi :

$$V_C = V_A + V_B$$

$$= k \frac{Q_A}{R_A} + k \frac{Q_B}{R_B}$$

$$= \frac{k}{R_A} (Q_A + Q_B)$$

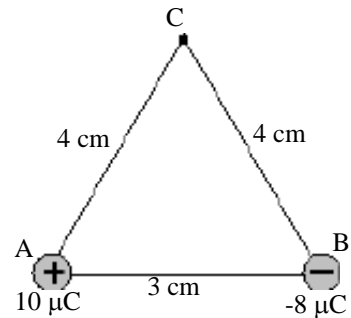
$$= \frac{9 \cdot 10^9}{8 \cdot 10^{-2}} (-4 \cdot 10^{-6} + 8 \cdot 10^{-6}) = 4,5 \cdot 10^5 \text{ volt}$$



Gambar 4.13

*Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.*

Perhatikan muatan-muatan pada titik sudut segitiga sama kaki pada *Gambar 4.14*. Tentukan potensial listrik di titik C!



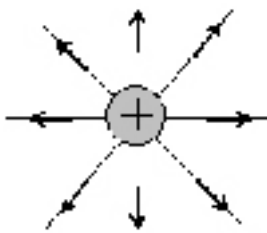
Gambar 4.14



### ATIHAN 4.2

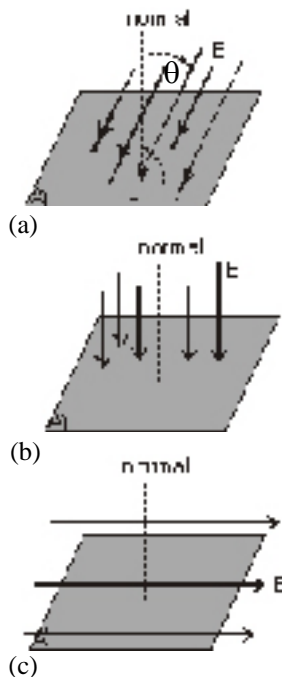
- Pada sumbu X terdapat muatan  $-2 \mu\text{C}$  di  $x = 10 \text{ cm}$ , muatan  $+5 \mu\text{C}$  di  $x = 15 \text{ cm}$  dan muatan  $+4 \mu\text{C}$  di titik  $x = 30 \text{ cm}$ . Tentukan :
  - potensial listrik pada titik  $x = -10 \text{ cm}$ ,
  - energi potensial yang dimiliki muatan  $q = -3 \mu\text{C}$  yang diletakkan di titik dengan  $x = -10 \text{ cm}$  tersebut !
- Pada keempat sudut bujur sangkar (sisi 25 cm) diletakkan muatan listrik. Tentukan :
  - potensial listrik di titik pusat bujur sangkar jika dua muatan yang bertetangga masing-masing  $+3 \mu\text{C}$  dan  $-3 \mu\text{C}$  !
  - energi potensial yang dimiliki oleh salah satu muatan  $-3 \mu\text{C}$  !

## C. Hukum Gauss



**Gambar 4.15**

Garis-garis medan listrik



**Gambar 4.16**

- (a) Garis-garis gaya listrik  $E$  membentuk sudut  $\theta$  dengan normal;  
 (b) Saling tegak lurus sehingga  $\phi$  maksimum,  $\theta = 0$   
 (c) Sejajar sehingga  $\phi = 0$  dan  $\theta = 90^\circ$

### Penting

Kuat medan listrik  $E$  = besaran vektor, luas penampang  $A$  juga vektor. Karena perkaliannya titik (dot) maka  $\phi$  merupakan besaran skalar.

### 1. Hubungan Fluks Listrik dan Kuat Medan Listrik

Medan listrik sebagai besaran vektor digambarkan dengan garis-garis yang memiliki arah atau anak panah. Contohnya medan listrik di sekitar muatan titik positif seperti pada *Gambar 4.15*. Jumlah garis-garis medan listrik yang menembus secara tegak lurus pada suatu bidang dinamakan dengan fluks listrik dan disimbolkan  $\phi$ .

Bagaimana dengan medan listriknya? Besar medan listrik disebut dengan kuat medan listrik dapat didefinisikan juga sebagai kerapatan garis-garis medan listrik.

Dari dua pengertian di atas dapat dirumuskan hubungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \phi &= E \cdot A \\ \text{atau} \quad \phi &= E \cdot A \cos \theta \end{aligned} \quad (4.6)$$

dengan :  $\phi$  = fluks listrik (weber)

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

$A$  = luas bidang yang terbatas garis-garis gaya ( $m^2$ )

$\theta$  = sudut antara  $E$  dengan normal bidang

Dengan menggunakan definisi dua besaran di atas, Gauss merumuskan hubungan antar besaran sebagai berikut.

*“Jumlah garis medan (fluks listrik) yang menembus suatu permukaannya sebanding dengan jumlah muatan listrik yang dilingkupi oleh permukaan tersebut”.*

Pernyataan di atas itulah yang dikenal sebagai *hukum Gauss* dan dapat dirumuskan sebagai berikut

Faktor pembanding yang sesuai adalah  $\frac{1}{\epsilon_0}$  Sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \phi &\sim q \\ \text{atau} \quad \phi &= \frac{q}{\epsilon_0} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Perhatikan penerapan hukum Gauss tersebut pada bola konduktor dan keping sejajar seperti penjelasan berikut.

### 2. Bola Konduktor Bermuatan

Bola konduktor berjari-jari  $R$  diberi muatan  $Q$  maka muatan itu akan tersebar pada permukaan bola seperti pada *Gambar 4.17*. Bagaimana besaran-besaran

yang ditimbulkan oleh bola konduktor itu? Cermati pada penjelasan besaran-besaran di bawah.

### a. Medan listrik

Arah medan listrik oleh bola bermuatan sama dengan muatan titik yaitu meninggalkan muatan positif dan menuju muatan negatif. Sedangkan kuat medan listriknya dapat ditentukan dari hukum Gauss.

Dari hukum Gauss dapat dijelaskan bahwa medan listrik timbul jika ada muatan yang dilingkupinya. Bagaimana jika titiknya berada di dalam bola? Coba kalian lihat titik A pada *Gambar 4.17*. Luasan yang dibutuhkan titik A tidak melingkupi muatan berarti kuat medannya nol,  $E_A = 0$ .

Untuk titik di permukaan bola dan di luar bola akan memiliki luasan yang melingkupi muatan  $Q$  tersebut sehingga dapat diturunkan dengan hukum Gauss sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{Q}{\epsilon_0} \\ E \cdot (4\pi R^2) &= \frac{Q}{\epsilon_0} \\ E &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}\end{aligned}$$

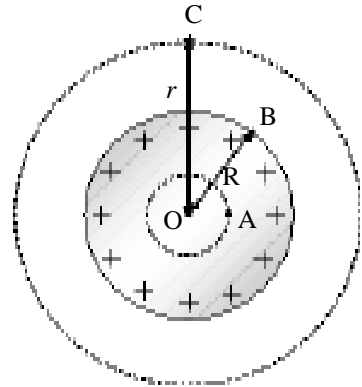
Jadi dapat disimpulkan kuat medan listrik oleh bola konduktor sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\text{di dalam bola} &: E = 0 \\ \text{di luar/permukaan} &: E = k \frac{Q}{r^2} \dots\dots\dots (4.8) \\ (\text{permukaan } r = R)\end{aligned}$$

### 3. Potensial Listrik

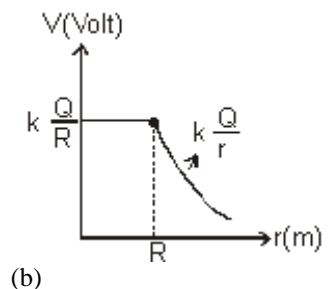
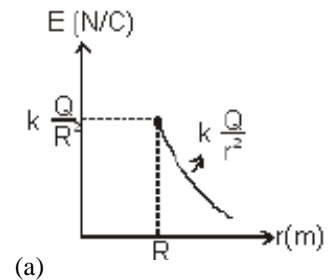
Potensial listrik oleh bola bermuatan juga ada dua keadaan. *Pertama* : di dalam bola ternyata sama dengan di permukaan. *Kedua*, di luar bola. Persamaannya sama.

$$\begin{aligned}\blacksquare \text{ Di dalam/di permukaan} &: V = k \frac{Q}{R} \\ \blacksquare \text{ Di luar} &: V = k \frac{Q}{r} \dots\dots\dots (4.9)\end{aligned}$$



**Gambar 4.17**

Bola konduktor bermuatan



**Gambar 4.18**

Grafik (a) hubungan  $E$  dan  $r$  (b) hubungan  $V$  dan  $r$  pada bola konduktor bermuatan.

### CONTOH 4.7

Sebuah bola konduktor diberi muatan  $+12 \mu\text{C}$  dan berjari-jari 4 cm. Jika ada tiga titik A, B dan C yang dari pusat berjarak  $R_A = 3 \text{ cm}$ ,  $R_B = 4 \text{ cm}$  dan  $R_C = 6 \text{ cm}$

maka tentukan :

- kuat medan listrik di titik A, B dan C
- potensial listrik di titik A, B dan C

### Penyelesaian

$$Q = +12 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

$$R = 4 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

- Kuat medan listrik :

■ Titik A :  $R_A < R_B$ , di dalam bola berarti  $E_A = 0$

■ Titik B : di permukaan bola :

$$\begin{aligned} E_B &= k \frac{Q}{R_B^2} \\ &= 9 \cdot 10^9 \frac{12 \cdot 10^{-6}}{(4 \cdot 10^{-2})^2} = 6,75 \cdot 10^7 \text{ N/C} \end{aligned}$$

■ Titik C : di luar bola :

$$\begin{aligned} E_C &= k \frac{Q}{r_C^2} \\ &= 9 \cdot 10^9 \frac{12 \cdot 10^{-6}}{(6 \cdot 10^{-2})^2} = 3 \cdot 10^7 \text{ N/C} \end{aligned}$$

- Potensial listrik

■ Di titik A sama dengan di titik B :

$$\begin{aligned} V_A &= V_B = k \frac{Q}{R} \\ &= 9 \cdot 10^9 \frac{12 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-2}} = 2,7 \cdot 10^6 \text{ volt} \end{aligned}$$

■ Di titik C :

$$\begin{aligned} V_C &= k \frac{Q}{r} \\ &= 9 \cdot 10^9 \frac{12 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 10^{-2}} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ volt} \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Bola konduktor berjari-jari 6 cm diberi muatan  $2 \cdot 10^{-12}$  C. Tentukan kuat medan listrik dan potensial listrik di titik :

- A yang berjarak 4 cm dari pusat
- B yang berjarak 6 cm dari pusat
- C yang berjarak 10 cm dari pusat

#### 4. Keping Sejajar Bermuatan

Keping sejajar adalah dua keping konduktor dengan luas sama dan bahan sama. Jika dihubungkan dengan sumber tegangan  $V$  maka akan menyimpan muatan yang sama besar berlainan jenis seperti pada *Gambar 4.19*.

Di daerah antar keping dapat digambarkan permukaan yang tertembus garis-garis medan seluas  $A$  secara tegak lurus (sejajar garis normal) sehingga akan berlaku hukum Gauss sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{q}{\epsilon_0} \\ EA \cos 0^\circ &= \frac{q}{\epsilon_0} \\ E &= \frac{q}{A\epsilon_0} \dots\dots\dots (4.10)\end{aligned}$$

Berarti bila ada muatan positif  $+q$  atau dilepas di sekitar keping A maka muatan tersebut akan mendapat gaya ke kanan sebesar :

$$F = qE \dots\dots\dots (4.11)$$

Jika muatan telah berpindah dari titik A ke titik B maka akan terjadi perubahan energi potensial sebesar :

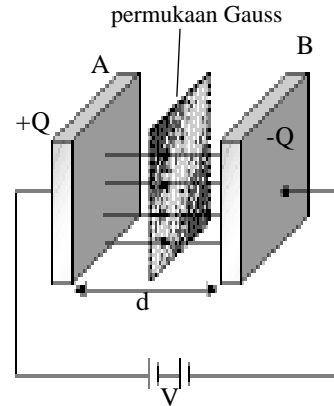
$$\begin{aligned}W &= \Delta E_p \\ F \cdot d &= qV \\ qE \cdot d &= qV \\ E &= \frac{V}{d} \dots\dots\dots (4.12)\end{aligned}$$

Medan gaya elektrostatis (medan listrik) merupakan *medan gaya konservatif* berarti pada gerak muatan di antara keping sejajar akan berlaku hukum kekekalan energi mekanik.

$$\begin{aligned}Em_A &= Em_B \\ Ep_A + Ek_A &= Ep_B + Ek_B\end{aligned}$$

Jika muatan dilepaskan dari A maka  $Ek_A = 0$  dan  $Ep_B$  akan bernilai nol karena elektron telah sampai pada kutub negatif sehingga berlaku :

$$\begin{aligned}qV + 0 &= 0 + \frac{1}{2}mv^2 \\ qV &= \frac{1}{2}mv^2 \dots\dots\dots (4.13)\end{aligned}$$



**Gambar 4.19**

Garis-garis medan listrik menembus tegak lurus berarti sejajar dengan garis normalnya dan  $\theta = 0^\circ$



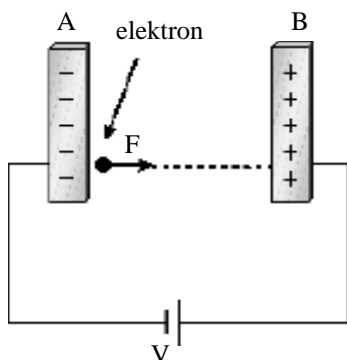
dengan :  $q$  = muatan yang bergerak atau dilepas (C)

$V$  = beda potensial (volt)

$m$  = massa partikel (kg)

$v$  = kecepatan partikel saat menumbuk keping (m/s)

Perhatikan cotton berikut. Lakukan analisa dan ambilah kesimpulan bagaimanakah menentukan penyelesaian terbaik pada keping sejajar. Kemudian carilah contoh-contoh soal lain karena pada keping sejajar ini banyak sekali variasi kejadiannya.



**Gambar 4.20**

Gerak elektron diantara keping sejajar.

### CONTOH 4.8

Dua keping sejajar memiliki luas penampang  $6 \text{ cm}^2$  berjarak  $10 \text{ cm}$  satu dengan yang lain. Kedua keping itu dihubungkan pada beda potensial  $400 \text{ volt}$ . Jika sebuah elektron dilepaskan dari keping yang bermuatan negatif,  $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  dan  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  maka tentukan :

- gaya yang dialami elektron,
- usaha yang dikerjakan elektron,
- kecepatan elektron saat menumbuk keping positif !

#### Penyelesaian

$$d = 10 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ m}$$

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

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$V = 400 \text{ volt}$$

- Gaya yang dirasakan elektron memenuhi :

$$F = e E$$

$$= e \frac{V}{d}$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{400}{10^{-1}} = 6,4 \cdot 10^{-16} \text{ N}$$

- Usaha yang dikerjakan elektron :

$$W = \Delta E_p$$

$$= e V$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 400 = 6,4 \cdot 10^{-17} \text{ joule}$$

- Kecepatan elektron saat menumbuk keping positif dapat ditentukan dari kekekalan energi :

$$\frac{1}{2} m v^2 = e V$$

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 400}{9,11 \cdot 10^{-31}}}$$

$$= 1,21 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

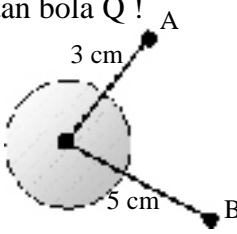
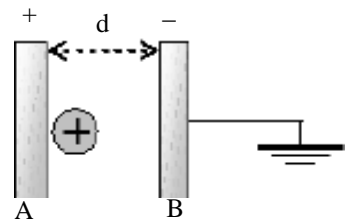
**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Dua keping sejajar masing-masing dihubungkan pada sumber tegangan 200 volt. Jarak antar keping 20 cm dan luas keping 15 cm<sup>2</sup>. Sebuah proton  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C dan  $m = 1,6 \cdot 10^{-27}$  kg dilepaskan dari keping yang bermuatan positif, tentukan :

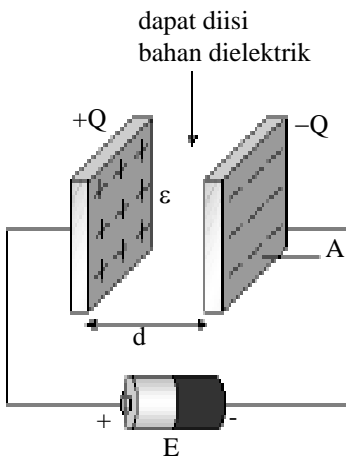
- kuat medan listrik diantara kedua keping,
- gaya yang dirasakan proton,
- perubahan energi potensial proton,
- kecepatan proton saat menumbuk keping!



### ATIHAN 3

- Bola konduktor yang berdiameter 20 cm diberi muatan + 5  $\mu$ C. Tentukan kuat medan listrik dan potensial listrik pada titik :
  - A yang berjarak 5 cm dari pusat,
  - B yang berjarak 12 cm dari pusat,
  - Dipermukaan bola!
- Bola konduktor terlihat seperti gambar di bawah. Bola bermuatan listrik + Q. Apabila beda potensial titik A dan B adalah 4,25. 10<sup>5</sup> volt, maka tentukan besar muatan bola Q !
 
- Dua keping penghantar seluas 2 m<sup>2</sup> diletakkan sejajar satu sama lain pada jarak 10 cm. Penghantar yang satu diberi potensial + 50 volt dan penghantar yang lain - 50 volt. Berapakah besar gaya yang dialami sebuah muatan  $q = 2 \cdot 10^{-2}$  C yang berada di antara kedua bidang tersebut ?
- Sebuah elektron dari keadaan diam kemudian bergerak dalam keping sejajar yang memiliki beda potensial 1000 V. Jika massa elektron 9,11 x 10<sup>-31</sup> kg dan muatannya -1,6 x 10<sup>-19</sup> C maka tentukan :
  - Penurunan energi potensial elektron
  - Usaha yang dilakukan medan listrik keping
- Proton yang bergerak dari keping A ke B seperti gambar di bawah. Saat menumbuk keping proton memperoleh kecepatan 5.10<sup>5</sup> m/s. Jika antara dua keping vakum, d = 2 cm dan massa proton = 1,6.10<sup>-27</sup> kg, muatan proton = 1,6.10<sup>-19</sup> C maka tentukan beda potensial keping sejajar tersebut !
 

## D. Kapasitor



Gambar 4.21

Kapasitor merupakan komponen listrik yang dibuat dari pengembangan keping sejajar. Seperti pada sub bab sebelumnya, jika ada keping sejajar maka kedua kepingnya akan menyimpan muatan berlainan jenis sama besar. Dari sifatnya yang dapat menyimpan muatan inilah kapasitor banyak dimanfaatkan dalam dunia elektronik. Contoh pemanfaatan kapasitor adalah sebagai filter tegangan pada power suply, rangkaian tuning pada radio dan perata tegangan pada adaptor.

### 1. Penyimpan Muatan dan Energi

Seperti penjelasan di atas, kapasitor dapat menyimpan muatan. Muatan yang tersimpan itu sebanding dengan beda potensialnya. Lihat Gambar 4.22. Konstanta pembandingnya disebut *kapasitas kapasitor* dan disimbulkan C.

$$\begin{aligned} Q &\sim V \\ \text{dan } Q &= C V \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4.14)$$

dengan :  $Q =$  muatan yang tersimpan (C)

$V =$  beda potensial keping-keping

$C =$  kapasitas kapasitor (farad)

Kapasitas kapasitor ini ternyata nilainya sebanding dengan luas penampang keping, sebanding dengan permitivitas relatif bahan dielektrik dan berbanding terbalik dengan jarak kedua keping. Kesebandingan ini dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad \dots\dots\dots (4.15)$$

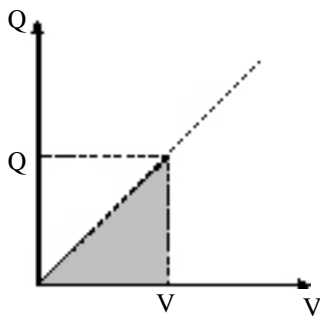
dengan :  $C =$  kapasitas kapasitor (farad)

$\epsilon_r =$  permitivitas relatif bahan dielektrik

$\epsilon_0 =$  permitivitas ruang hampa ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  C<sup>2</sup>/Nm<sup>2</sup>)

$A =$  luas penampang (m<sup>2</sup>)

$d =$  jarak antar keping (m)



Gambar 4.22

Menyimpan muatan berarti pula menyimpan energi dalam bentuk energi potensial listrik. Berapa besar energi yang tersimpan kapasitor tersebut ? Besarnya dapat kalian hitung dari luas kurva terarsir pada Gambar 4.22. Luasnya berbentuk segitiga berarti memenuhi persamaan berikut.

$$W = \frac{1}{2} Q V \quad \dots\dots\dots (4.16)$$

Persamaan energi yang disimpan kapasitor ini dapat dikembangkan dengan substitusi  $Q = C V$  dari persamaan 4.14. Gunakan variasi persamaan itu saat menentukan energi yang tersimpan kapasitor pada suatu persoalan kapasitor.

### CONTOH 4.9

Sebuah kapasitor luas penampang platnya  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  dan diantaranya hanya berjarak 2 mm. Jika ujung-ujung kapasitor itu dihubungkan pada beda potensial 10 volt maka tentukan :

- Kapasitas kapasitor,
- muatan yang tersimpan,
- energi yang tersimpan kapasitor!

#### Penyelesaian

$$A = 20 \times 20 = 400 \text{ cm}^2 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$d = 2 \text{ mm} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$$

$$V = 10 \text{ volt}$$

- Kapasitas kapasitor sebesar :

$$\begin{aligned} C &= \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \\ &= 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-3}} = 17,7 \cdot 10^{-11} \text{ F} \end{aligned}$$

- Muatan yang disimpan sebesar :

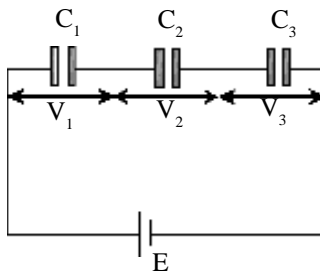
$$\begin{aligned} Q &= C V \\ &= 17,7 \cdot 10^{-11} \cdot 10 = 1,77 \cdot 10^{-9} \text{ C} \end{aligned}$$

- Energi yang tersimpan memenuhi :

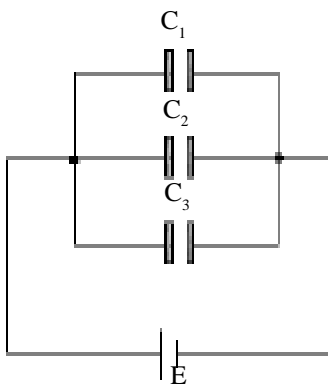
$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} Q V \\ &= \frac{1}{2} \cdot 1,77 \cdot 10^{-9} \cdot 10 = 8,85 \cdot 10^{-9} \text{ joule} \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Kapasitas keping sejajar luasnya  $200 \text{ cm}^2$  dan jarak antar keping 8,85 mm. Bahan dielektriknya adalah hampa udara. Jika dihubungkan beda potensial 20 volt maka tentukan muatan dan energi kapasitor yang tersimpan!



**Gambar 4.23**  
Rangkaian C seri



**Gambar 4.24**  
Rangkaian C paralel

## 2. Rangkaian Kapasitor

### a. Rangkaian seri

Dua kapasitor atau lebih dapat disusun dengan ujung yang disambung-sambungkan secara berurutan seperti pada *Gambar 4.23*. Pada rangkaian seri ini muatan yang tersimpan pada kapasitor akan sama,  $Q$  sama. Akibatnya beda potensial tiap kapasitor akan berbanding terbalik dengan kapasitas kapasitornya. Perhatikan persamaan 4.14,  $Q = CV$ .

Pada rangkaian seri beda potensial sumber  $E$  akan terbagi menjadi tiga bagian. Dari penjelasan ini dapat disimpulkan sifat-sifat yang dimiliki rangkaian seri sebagai berikut.

$$\text{a. } Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_{\text{tot}}$$

$$\text{b. } E = V_1 + V_2 + V_3 \quad \dots\dots\dots (4.17)$$

$$V \sim \frac{1}{C}$$

$$\text{c. } \frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

### b. Rangkaian paralel

Rangkaian paralel adalah gabungan dua kapasitor atau lebih dengan kutub-kutub yang sama menyatu seperti *Gambar 4.24*. Pada rangkaian ini beda potensial ujung-ujung kapasitor akan sama karena posisinya sama. Akibatnya muatan yang tersimpan sebanding dengan kapasitornya. Muatan total yang tersimpan sama dengan jumlah totalnya.

Perhatikan peringkasan sifat-sifat tersebut pada persamaan berikut.

$$\text{a. } E = V_1 + V_2 + V_3$$

$$\text{b. } Q_{\text{tot}} = Q_1 = Q_2 = Q_3 \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

$$Q \sim C$$

$$\text{c. } C_p = C_1 + C_2 + C_3$$

### c. Rangkaian campuran

Rangkaian campuran adalah rangkaian gabungan dari rangkaian seri dan paralel. Penyelesaian soal ini menyelesaikan hubungan beberapa kapasitor yang dapat ditentukan seri atau paralelnya terlebih dahulu.

### CONTOH 4.10

Tiga buah kapasitor dirangkai seperti *Gambar 4.25(a)*  $C_1 = 300 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 200 \mu\text{F}$  dan  $C_3 = 400 \mu\text{F}$ . Tentukan :

- kapasitas pengganti total,
- muatan yang tersimpan c,
- beda potensial b c,
- muatan yang tersimpan  $C_2$  dan  $C_3$ !

### Penyelesaian

$$C_1 = 300 \mu\text{F}$$

$$C_2 = 200 \mu\text{F}$$

$$C_3 = 400 \mu\text{F}$$

$$E = 120 \text{ volt}$$

- Kapasitas penggantian dapat ditentukan sebagai berikut.

- $C_2$  dan  $C_3$  terhubung paralel sehingga dapat diganti  $C_p$  seperti pada *Gambar 4.25(b)*.

$$\begin{aligned} C_p &= C_2 + C_4 \\ &= 200 + 400 = 600 \mu\text{F} \end{aligned}$$

- $C_p$  dan  $C_1$  terhubung seri sehingga dapat diganti  $C_s$  seperti pada *Gambar 4.25(c)*. Nilai  $C_s$  memenuhi persamaan berikut .

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_s} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_p} \\ &= \frac{1}{300} + \frac{1}{600} = \frac{3}{600} \end{aligned}$$

$$C_s = \frac{600}{3} = 200 \mu\text{F}$$

dari nilai  $C_s$  inilah dapat diperoleh  $C_{\text{tot}}$  karena  $C_{\text{tot}}$  itu sama dengan  $C_s$ .

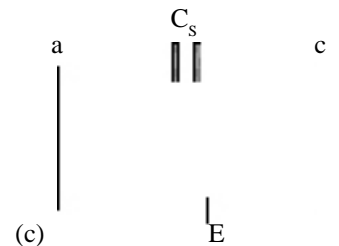
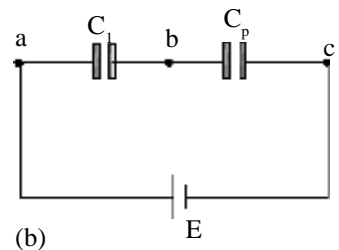
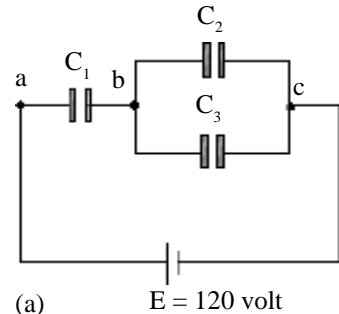
$$C_{\text{tot}} = C_s = 200 \mu\text{F}$$

- Muatan yang tersimpan pada  $C_1$  memenuhi :

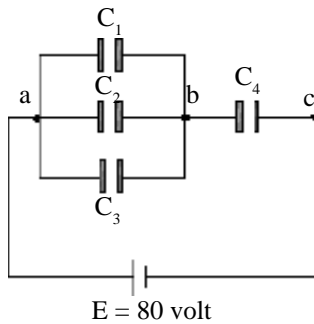
$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_{\text{tot}} \\ &= C_{\text{tot}} \cdot V_{\text{tot}} \\ &= (200 \cdot 10^{-6}) \cdot 120 = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ C} \end{aligned}$$

- Beda potensial bc dapat ditentukan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} V_{bc} &= \frac{Q_{\text{tot}}}{C_p} \\ &= \frac{2,4 \cdot 10^{-2}}{600 \cdot 10^{-6}} = 40 \text{ volt} \end{aligned}$$



**Gambar 4.25**



Gambar 4.26

d. Muatan yang tersimpan di  $C_2$  dan  $C_3$  memenuhi :

$$Q_2 = C_2 V_{bc} \\ = 200 \cdot 10^{-6} \cdot 40 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ C}$$

$$Q_3 = C_3 V_{bc} \\ = 400 \cdot 10^{-6} \cdot 40 = 16 \cdot 10^{-3} \text{ C}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

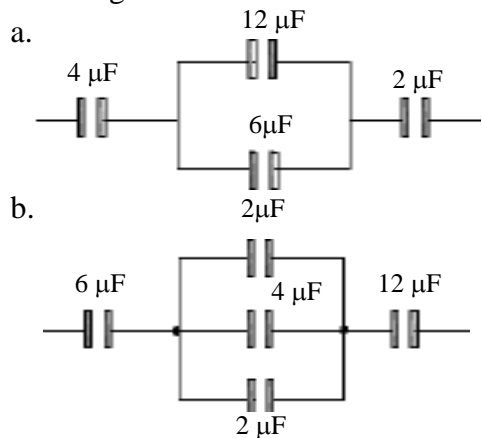
Empat buah kapasitor tersusun seperti Gambar 4.26.  $C_1 = 300 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 400 \mu\text{F}$ ,  $C_3 = 500 \mu\text{F}$  dan  $C_4 = 600 \mu\text{F}$ . Jika rangkaian dihubungkan beda potensial 80 volt maka tentukan :

- Kapasitas pengganti,
- muatan yang tersimpan di masing-masing kapasitor,
- beda potensial  $V_{ab}$  dan  $V_{bc}$ ?



## LATIHAN 4.4

- Sebuah kapasitor keping sejajar di udara memiliki kapasitansi  $C$ . Bila jarak kedua kepingnya diubah menjadi  $\frac{1}{2}$  kali semula dan kedua keping dicelupkan ke dalam medium dengan konstanta dielektrikum 2, maka tentukan kapasitansinya sekarang !
- Tiga buah kapasitor masing-masing  $2 \mu\text{F}$ ,  $3 \mu\text{F}$  dan  $6 \mu\text{F}$  dirangkai seri kemudian dihubungkan dengan sumber tegangan 12 volt. Tentukan :
  - kapasitas penggantinya,
  - tegangan pada masing-masing kapasitor,
  - muatan yang disimpan masing-masing kapasitor !
- Kapasitor  $C_1$  dan  $C_2$  yang dipasang paralel masing-masing mempunyai kapasitas  $2 \mu\text{F}$  dan  $4 \mu\text{F}$ . Jika tegangan ujung-ujung kapasitor adalah 12 volt maka tentukan :
  - Kapasitas pengganti kedua kapasitor,
  - Beda potensial masing-masing kapasitor,
  - Muatan listrik yang disimpan masing-masing kapasitor,
  - Energi yang tersimpan masing-masing kapasitor !
- Kapasitor  $2 \mu\text{F}$  yang berpotensi 15 volt dihubungkan paralel dengan kapasitor  $4 \mu\text{F}$  yang berpotensi 30 volt dengan dihubungkan ujung-ujung yang sama tanda muatannya, maka berapakah potensial gabungannya ?



## Rangkuman Bab 4

1. Setiap dua muatan berdekatan akan mendapat gaya Coulomb :  
Besarnya :  $F = k \frac{Q_1 Q_2}{R^2}$

Arahnya : Sejenis tolak menolak dan berlainan jenis tarik menarik

2. Medan listrik adalah daerah yang masih dirasakan gaya Coulomb atau gaya elektrostatik.

Arahnya : meninggalkan muatan positif dan menuju muatan positif

Besarnya :  $E = \frac{F}{Q} = k \frac{Q}{R^2}$

3. Energi potensial merupakan besaran skalar, besarnya memenuhi :

$$E_p = k \frac{Q_1 Q_2}{R}$$

4. Potensial listrik memenuhi :

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

5. Pada bola konduktor bermuatan memenuhi :

a. di titik di dalam bola :  $E = 0$  dan  $V$  sama dengan  $V$  di permukaan

b. di permukaan bola :

$$E = k \frac{Q}{R^2} \quad \text{dan} \quad V = k \frac{Q}{R}$$

c. di luar bola ( $r > R$ )

$$E = k \frac{Q}{r^2} \quad \text{dan} \quad V = k \frac{Q}{r}$$

6. Pada keping sejajar terdapat muatan listrik dan memenuhi hubungan :

a.  $E = \frac{V}{d}$

b. gaya  $F = q E$

c. berlaku kekekalan energi :

$$q V = \frac{1}{2} m v^2$$



## Evaluasi Bab 4

Pilihlah jawaban yang benar pada soal – soal berikut dan kerjakan di buku tugas kalian.

1. Diketahui muatan listrik  $Q_1$  positif dan  $Q_2$  negatif.....  
 (1) muatan  $Q_1$  menarik muatan  $Q_2$   
 (2) gaya coulomb sebanding dengan  $Q_1$  dan  $Q_2$   
 (3) gaya coulomb berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara  $Q_1$  dan  $Q_2$   
 (4) kuat medan listrik di tengah-tengah antara  $Q_1$  dan  $Q_2$  nol  
 yang benar adalah ....

A. 1, 2, 3 dan 4      D. 2 dan 4  
 B. 1, 2 dan 3      E. 4  
 C. 1 dan 3

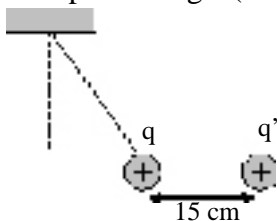
2. Dua muatan titik yang sejenis dan sama besar  $q_A = q_B = 10^{-2} \mu\text{C}$  pada jarak 10 cm satu dari yang lain.

$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ . Gaya tolak yang dialami kedua muatan itu (dalam Newton) adalah ....

A.  $9 \cdot 10^{-14}$       D.  $9 \cdot 10^3$   
 B.  $9 \cdot 10^{-9}$       E.  $9 \cdot 10^7$   
 C.  $9 \cdot 10^{-5}$

3. Sebuah benda bermassa 20 gram dan bermuatan  $q = +0,5 \mu\text{C}$  digantungkan pada seutas tali ringan yang massanya dapat diabaikan. Tepat di sebelah kanan benda pada jarak 15 cm diletakkan muatan  $q' = -1 \mu\text{C}$  yang menyebabkan posisi benda menjadi seperti gambar di bawah. Jika  $g = 10 \text{ ms}^{-2}$  dan  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ , tegangan pada tali dekat pada harga (dalam newton )

A. 0,20  
 B. 0,24  
 C. 0,28  
 D. 0,32  
 E. 0,40



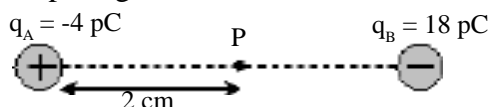
4. Kuat medan listrik yang ditimbulkan oleh muatan listrik pada sebuah titik bergantung pada....

(1) besarnya muatan  
 (2) jaraknya dari muatan  
 (3) jenis muatan  
 (4) jenis medium antara muatan dan titik

yang benar adalah ....

A. 1, 2, 3 dan 4      D. 2 dan 4  
 B. 1, 2 dan 3      E. 4  
 C. 1 dan 3

5. Dua muatan titik berjarak 5 cm terlihat seperti gambar.

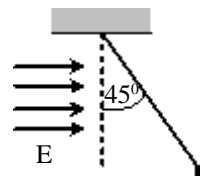


Besar medan listrik di titik P adalah ....

A. 27 N/C      D. 360 N/C  
 B. 72 N/C      E. 720 N/C  
 C. 270 N/C

6. Sebuah partikel bermassa 0,3 gr diikat dengan benang tak bermassa. Kemudian dimasukkan ke dalam daerah bermedan listrik 500 N/C dan digantungkan ternyata membentuk sudut seperti pada gambar di bawah. Keadaan ini bisa terjadi apabila partikel itu bermuatan (dalam  $\mu\text{C}$ ) sebesar

A. 1  
 B. 3  
 C.  $3\sqrt{2}$   
 D. 6  
 E. 6



7. Dua buah partikel A dan B masing-masing bermuatan  $+20 \mu\text{C}$  dan  $+45 \mu\text{C}$  terpisah dengan jarak 15 cm. Jika C adalah titik yang terletak di antara A dan B sedemikian sehingga kuat

medan di C sama dengan nol, maka letak C dari A (dalam cm) adalah....

- A. 2
  - B. 3
  - C. 4
  - D. 6
  - E. 9
8. Potensial di suatu titik yang berjarak  $r$  dari muatan  $Q$  adalah 600V. Intensitas medan di titik tersebut 400 N/C. Jika  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ , maka besar muatan  $Q$  adalah ....
- A.  $1,50 \cdot 10^{-9} \text{ C}$
  - B.  $2,25 \cdot 10^{-9} \text{ C}$
  - C.  $4,40 \cdot 10^{-9} \text{ C}$
  - D.  $7 \cdot 10^{-9} \text{ C}$
  - E.  $1 \cdot 10^{-9} \text{ C}$
9. Pada setiap titik sudut sebuah segitiga sama sisi dengan sisi terdapat muatan positif  $q$ . Kuat medan dan potensial listrik di pusat segitiga ini, dengan  $k$  sebagai tetapan, berturut-turut adalah....
- A.  $\frac{1}{2} k q$  dan 0
  - B.  $\frac{1}{2} k q$  dan  $k q$
  - C.  $k q$  dan  $k q$
  - D. 0 dan  $k q$
  - E. 0 dan  $k q$
10. Sebuah bola konduktor berjari – jari 9 cm diberi muatan 6 mC. Besar kuat medan listrik dan potensial listrik pada titik yang berjarak 3 cm dari pusat bola adalah ....
- A. sama – sama nol
  - B.  $E = \text{nol}$ ,  $V = 6 \cdot 10^5 \text{ volt}$
  - C.  $E = 6 \cdot 10^7 \text{ N/C}$ ,  $V = \text{nol}$
  - D.  $E = 6 \cdot 10^7 \text{ N/C}$ ,  $V = 6 \cdot 10^5 \text{ volt}$
  - E.  $E = 6 \cdot 10^7 \text{ N/C}$ ,  $V = 18 \cdot 10^5 \text{ volt}$
11. Sebuah bola konduktor diberi muatan  $Q = 3 \mu\text{C}$ . Diameter bola 20 cm. Jika muatan kecil  $q = 2 \mu\text{C}$  ingin dipindahkan dari permukaan bola ke titik yang berjarak 5 cm dari pusat bola maka diperlukan usaha sebesar ....
- A. 2500 joule
  - B. 1300 joule
  - C. 500 joule
  - D. 25 joule
  - E. nol
12. Dua keping logam yang sejajar dan jaraknya 0,5 cm satu dari yang lain diberi muatan listrik yang berlawanan

(lihat gambar) hingga beda potensial 10000 Volt. Bila muatan elektron adalah  $1,6 \times 10^{-19}$  C maka besar dan arah gaya coulomb pada sebuah elektron yang ada diantara kedua keping adalah ....

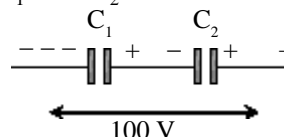
          + + + + +          



- A.  $0,8 \times 10^{-7}$  N ke atas  
B.  $0,8 \times 10^{-7}$  N ke bawah  
C.  $3,2 \times 10^{-13}$  N ke atas  
D.  $3,2 \times 10^{-13}$  N ke bawah  
E.  $12,5 \times 10^{24}$  N ke atas
13. Sebuah elektron (muatan  $-1,6 \times 10^{-19}$  C) bergerak dari suatu titik dalam ruang ke titik lain yang potensialnya 1 V lebih tinggi. Energi kinetik yang diperoleh elektron dalam perpindahan kedudukan itu dapat dinyatakan sebagai..  
(1)  $1,6 \times 10^{-19}$  Joule  
(2) 1 elektron volt  
(3)  $1,6 \times 10^{-19}$  coulomb volt  
(4) 1 volt ampere  
yang benar adalah ....  
A. 1, 2, 3 dan 4                      D. 2 dan 4  
B. 1, 2 dan 3                        E. 4  
C. 1 dan 3
14. Sebuah elektron dengan massa  $9,11 \times 10^{-31}$  kg dan muatan listrik  $-1,6 \times 10^{-19}$  C, lepas dari katode menuju ke anode yang jaraknya 2 cm. Jika kecepatan awal elektron 0 dan beda potensial antara anode dan katode 200 V, maka elektron akan sampai di anode dengan kecepatan ....  
A.  $2,3 \times 10^5$  m/s  
B.  $8,4 \times 10^6$  m/s  
C.  $2,3 \times 10^7$  m/s  
D.  $3 \times 10^7$  m/s  
E.  $2,4 \times 10^8$  m/s
15. Kapasitas kapasitor dapat diperkecil dengan cara-cara sebagai berikut ....  
(1) ruang antar lempeng diisi minyak

- (2) dengan pasangan seri beberapa kapasitor  
 (3) jarak kedua lempeng diperkecil  
 (4) luas lempengnya diperkecil.  
 yang benar adalah ....
- A. 1, 2, 3 dan 4      D. 2 dan 4  
 B. 1, 2 dan 3      E. 4  
 C. 1 dan 3
16. Tiga buah kapasitor identik yang mula-mula belum bermuatan akan dihubung dengan baterai 15 V. Bila hanya salah satunya saja yang dihubungkan dengan baterai 15 V tersebut, energi yang tersimpan dalam kapasitor adalah  $\frac{3}{2}E$ . Energi yang akan tersimpan bila ketiga kapasitor tadi dihubungkan seri dengan baterai adalah ....
- A.  $\frac{1}{4} E$       D.  $2 E$   
 B.  $\frac{1}{2} E$       E.  $4 E$   
 C.  $E$
17. Tiga kapasitor A, B, dan C masing-masing berkapasitas 4F, 6F, dan 12F disusun seri kemudian dihubungkan dengan tegangan 90V. Apabila muatan listrik masing-masing kapasitor  $q_A$ ,  $q_B$ , dan  $q_C$  maka ...
- A.  $q_C = 3 \times q_A$   
 B.  $q_A < q_B < q_C$   
 C.  $q_B = 0$   
 D.  $q_C = \frac{1}{3} \times q_A$   
 E.  $q_A = q_B = q_C$
18. Tiga buah kapasitor masing-masing  $6 \mu\text{F}$ ,  $12 \mu\text{F}$  dan  $4 \mu\text{F}$  dirangkai seri kemudian dihubungkan dengan sumber tegangan 8 volt. Tegangan pada kapasitor  $4 \mu\text{F}$  adalah ....
- A. 8,0 volt      D. 1,5 volt  
 B. 4,0 volt      E. 0,5 volt  
 C. 2,0 volt
19. Dua kapasitor dengan kapasitas  $C_1 = 30 \text{ pF}$  dan  $C_2 = 60 \text{ pF}$  dihubungkan seri, lalu dipasang pada tegangan listrik 100 V, seperti pada gambar. Bila

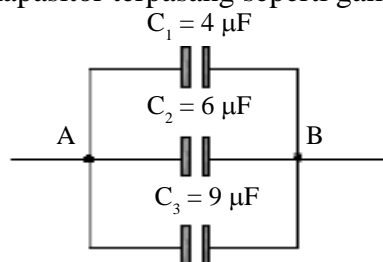
muatan listrik dan beda potensial pada masing-masing kapasitor adalah :  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $V_1$  dan  $V_2$  maka....



- (1).  $Q_1 = 2 \times 10^{-9} \text{ C}$   
 (2).  $Q_2 = 2 \times 10^{-9} \text{ C}$   
 (3).  $V_1 = 66,7 \text{ V}$   
 (4).  $V_2 = 33,3 \text{ V}$   
 yang benar adalah ....

- A. 1, 2, 3 dan 4      D. 2 dan 4  
 B. 1, 2 dan 3      E. 4  
 C. 1 dan 3

20. Kapasitor terpasang seperti gambar



Jika muatan yang tersimpan pada  $C_3$  adalah  $540 \mu\text{C}$ , maka ....

- (1) muatan yang tersimpan  $C_1 = 240 \mu\text{C}$   
 (2) beda potensial ujung-ujung  $C_2 = 60 \text{ V}$   
 (3) beda potensial  $AB = 60 \text{ V}$   
 (4) jumlah muatan total =  $360 \mu\text{C}$

21. Sebuah kapasitor dengan kapasitansi  $2 \cdot 10^{-5} \text{ F}$  yang pernah dihubungkan untuk beberapa saat lamanya pada beda potensial 500 V. Kedua ujungnya dihubungkan dengan ujung-ujung sebuah kapasitor lain dengan kapasitansinya  $3 \cdot 10^{-5} \text{ F}$  yang tidak bermuatan. Energi yang tersimpan di dalam kedua kapasitor adalah ....
- A. 0,25 J      D. 1,25 J  
 B. 0,50 J      E. 1,50 J  
 C. 1,00 J

**B A B**

**5**

## **INDUKSI MAGNET**



*Sumber: indonetwork-co.id*

Di SMP kalian telah dikenalkan dengan magnet batang. Apakah ada sumber lain yang dapat menghasilkan medan magnet selain batang magnet? Jawabnya dapat kalian lihat pada gambar di atas. Mengapa besi-besi tua itu dapat diangkat, bagaimana induksi magnet yang terjadi. Kejadian apa saja yang dapat menimbulkan gaya tarik magnet?

Semua hal di atas dapat kalian pelajari pada bab ini, oleh sebab itu setelah belajar bab ini kalian diharapkan dapat :

1. menentukan induksi magnet oleh kawat berarus,
2. menentukan gaya yang ditimbulkan oleh kawat berarus dalam medan magnet,
3. menentukan gaya yang ditimbulkan oleh muatan bergerak dalam medan magnet.

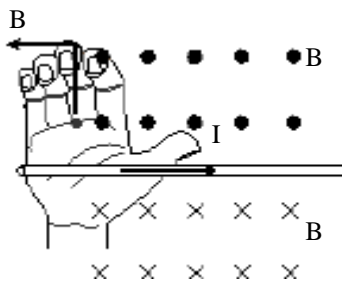
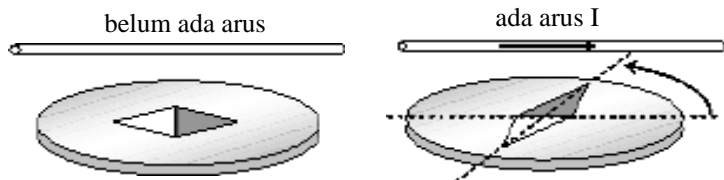
## A. Medan Magnet oleh Kawat Berarus

Pada awalnya orang menemukan bahwa logam-logam tertentu dapat dibuat sebagai magnet. Magnet inilah yang dapat menimbulkan medan magnet. Magnet ini ada yang berbentuk batang, jarum dan ladam. Batang magnet ini memiliki dua kutub yaitu kutub utara U dan kutub selatan S. Dua kutub sejenis akan tolak menolak dan kutub tidak sejenis akan tarik menarik.

Pada tahun 1820 seorang ilmuwan Denmark, *Hans*

**Gambar 5.1**

Pengaruh kawat berarus terhadap kompas



**Gambar 5.2**

Kaidah tangan kanan. Arah induksi magnet masuk bidang, gambar disimbolkan  $\otimes$  dan keluar bidang, gambar disimbolkan  $\odot$

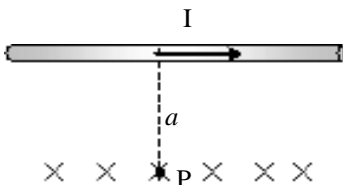
*Christian Oersted* (1777-1857) menemukan suatu gejala yang menarik. Saat jarum kompas diletakkan di sekitar kawat berarus ternyata jarum kompas menyimpang. Kemudian disimpulkan bahwa di sekitar kawat berarus timbul medan magnet. Medan magnet oleh kawat berarus inilah yang dinamakan induksi magnet.

Induksi magnet merupakan besaran vektor arahnya dapat ditentukan dengan menggunakan kaedah tangan kanan. Lihat *Gambar 5.2*. Ibu jari sebagai arah arus  $I$  dan empat jari lain sebagai arah induksi magnet  $B$ . Sedangkan besaran induksi magnetnya dipengaruhi oleh kuat arusnya  $I$ , jarak titik ke penghantar dan bentuk penghantarnya. Perhatikan penjelasan berikut.

### 1. Kawat Lurus Panjang Berarus

Induksi magnet di sekitar kawat lurus panjang sebanding dengan kuat arus  $I$  dan berbanding terbalik dengan jaraknya  $a$ . Konstanta pembandingnya adalah

$\frac{\mu_0}{2\pi}$ . Perhatikan persamaan berikut.



**Gambar 5.3**

Kawat lurus panjang berarus. Di titik P, induksi masuk bidang gambar (X)

$$B_p = \frac{\mu_0 i}{2\pi a} \dots\dots\dots (5.1)$$

dengan :  $B_p$  = induksi magnet di titik P (wb/m<sup>2</sup>)

$i$  = kuat arus listrik (A)

$a$  = jarak titik P ke kawat (m)

$\mu_0$  = permeabilitas hampa ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  wb/Am)

**CONTOH 5.1**

Dua kawat lurus panjang berarus listrik sejajar dengan jarak 15 cm. Kuat arusnya searah dengan besar  $I_A = 10$  A dan  $I_B = 15$  A. Tentukan induksi magnet di suatu titik C yang berada diantara kedua kawat berjarak 5 cm dari kawat  $I_A$ .

**Penyelesaian**

$$I_A = 10 \text{ A}$$

$$I_B = 15 \text{ A}$$

$$a_A = 5 \text{ cm}$$

$$a_B = 10 \text{ cm}$$

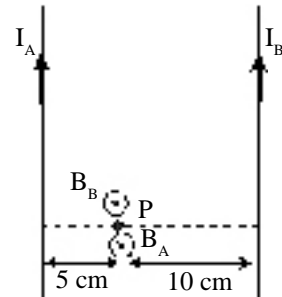
Letak titik C dapat dilihat seperti pada Gambar 5.4. Sesuai kaedah tangan kanan arah induksi magnetnya berlawanan arah sehingga memenuhi :

$$B_C = B_A - B_B$$

$$= \frac{\mu_0 I_A}{2\pi a_A} - \frac{\mu_0 I_B}{2\pi a_B}$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \frac{I_A}{a_A} - \frac{I_B}{a_B} \right)$$

$$= \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \left( \frac{10}{5 \cdot 10^{-2}} - \frac{15}{10^{-1}} \right) = 10^{-5} \text{ wb/m}^2$$

**Gambar 5.4**

Induksi magnet di suatu titik oleh dua kawat berarus.  $B_B$  keluar bidang dan  $B_A$  masuk bidang.

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

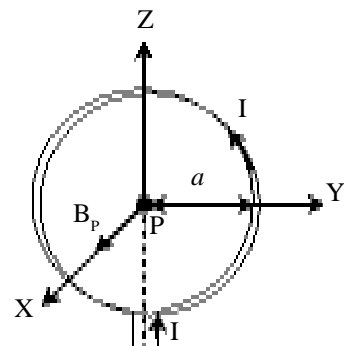
Dua kawat lurus panjang A dan B berjarak 10 cm satu sama lain. Keduanya dialiri arus sebesar  $I_A = 2$  A dan  $I_B = 3$  A. Tentukan :

- Induksi magnet di titik tengah antara kedua kawat,
- letak titik yang induksi magnetnya nol!

**2. Kawat Melingkar Berarus**

Perhatikan Gambar 5.5. Sebuah kawat dilingkar-lingkar kemudian dialiri arus, jari-jari  $a$  dan terdapat  $N$  lilitan. Sesuai kaedah tangan kanan, induksi magnet di pusat lingkaran P arahnya ke sumbu X positif. Besarnya induksi magnet sebanding dengan kuat arus  $I$  dan berbanding terbalik dengan  $a$ . Konstanta pembandingnya  $\frac{\mu_0}{2}$ .

$$B_p = \frac{\mu_0 i}{2a} \text{ N} \dots\dots\dots (5.2)$$

**Gambar 5.5**

Induksi magnet di pusat lingkaran.

**CONTOH 5.2**

Kawat melingkar terdiri dari 50 lilitan dialiri arus sebesar 5 A. Jari-jari lingkaran 15 cm. Tentukan besar induksi magnet di pusat lingkaran tersebut.

**Penyelesaian**

$$I = 5 \text{ A}$$

$$N = 50$$

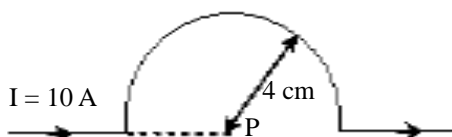
$$a = 15 \text{ cm} = 15 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Induksi magnet di pusat lingkaran memenuhi :

$$\begin{aligned} B_p &= \frac{\mu_0 i}{2a} N \\ &= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5}{2 \cdot 15 \cdot 10^{-2}} \cdot 50 = 3,3\pi \cdot 10^{-4} \text{ wb/m}^2 \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

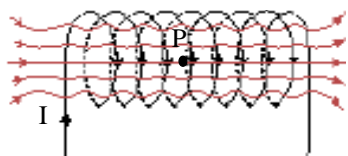
Sebuah kawat dibuat setengah lingkaran seperti gambar di bawah. Jika dialiri arus 10 A maka tentukan arah dan besar induksi magnet di titik P.

**3. Solenoida Berarus**

Solenoida adalah nama lain dari kumparan yang dipanjangkan, lihat *Gambar 5.6*. Kuat medan magnet pada titik yang berada di pusat sumbu solenoida memenuhi persamaan berikut.

$$B_p = \mu_0 i n$$

$$\text{dan } n = \frac{N}{\ell} \dots\dots\dots (5.3)$$



**Gambar 5.6**  
Solenoida berarus

**CONTOH 5.3**

Sebuah solenoida jari-jarinya 2 mm dan panjangnya 50 cm memiliki 400 lilitan. Jika dialiri arus 2 A maka tentukan induksi magnet di titik tengah suatu solenoida!

**Penyelesaian**

$$\ell = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$$

$$N = 400$$

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

Induksi magnet di titik tengah suatu solenoida sebesar :

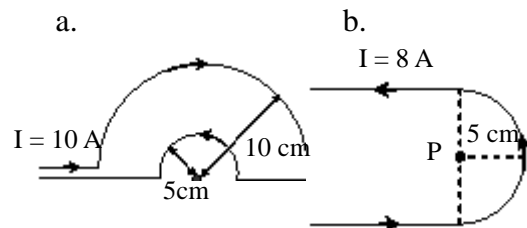
$$\begin{aligned} B &= \mu_0 i n \\ &= 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot \left( \frac{400}{0,5} \right) \\ &= 6,4\pi \cdot 10^{-4} \text{ wb/m}^2 \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

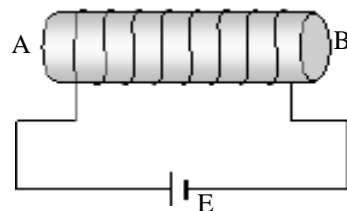
Kuat arus 5 A dialirkan pada solenoida yang memiliki kerapatan lilitan 1000 lilitan/m. Tentukan kuat medan magnet di titik tengah suatu solenoida.

**LATIHAN 5.1**

- Kawat lurus panjang berarus listrik 5 A diarahkan mendatar dari selatan ke utara. Tentukan arah dan besar induksi magnet pada titik yang berjarak 4 cm di :
  - atas kawat,
  - bawah kawat,
  - di timur kawat,
  - di barat kawat.
- Dua kawat lurus panjang berjarak 8 cm satu dengan yang lain. Kedua kawat dialiri arus  $I_1 = 5 \text{ A}$  dan  $I_2 = 6 \text{ A}$ . Tentukan kuat medan listrik di titik yang berjarak 2 cm dari  $I_1$  dan 6 cm dari  $I_2$ .
- Kawat A berarus 6 A dan kawat B berarus 8 A dipasang sejajar pada jarak 14 cm. Tentukan letak suatu titik yang memiliki kuat medan magnet nol jika :
  - arusnya searah,
  - arusnya berlawanan arah!
- Tentukan induksi magnet di titik P pada kawat-kawat berarus seperti di bawah.



- Sebuah solenoida dihubungkan dengan sumber arus seperti gambar di bawah. Solenoida itu dapat menjadi magnet. Tentukan kutub-kutub magnet yang terjadi !

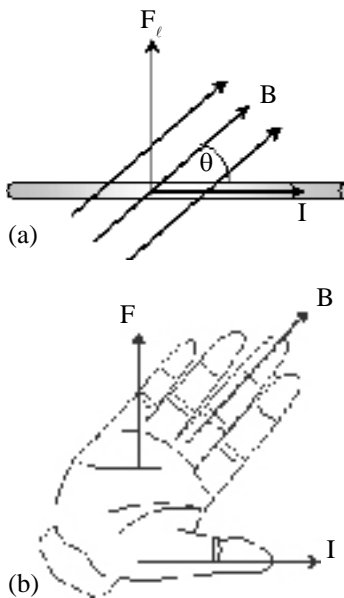


- Suatu solenoid memiliki panjang 1,5 meter dengan 500 lilitan dan jari-jari 5 mm. Bila solenoid itu dialiri arus sebesar 0,2 A, tentukanlah induksi magnet di tengah solenoid ! ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb / Am}$ )



## B. Gaya Lorentz

Sudah tahukah kalian dengan gaya Lorentz ? Di SMP kalian sudah belajar gaya ini. Gaya Lorentz merupakan nama lain dari gaya magnetik yaitu gaya yang ditimbulkan oleh medan magnet. Kapan akan timbul bila ada interaksi dua medan magnet, contohnya adalah kawat berarus dalam medan magnet, kawat sejajar berarus dan muatan yang bergerak dalam medan magnet. Cermati penjelasan berikut.



Gambar 5.7

### 1. Kawat Berarus dalam Medan Magnet

Pada setiap kawat berarus yang diletakkan dalam daerah bermedan magnet maka kawat tersebut akan merasakan gaya magnet. Gaya magnet atau gaya Lorentz merupakan besaran vektor. Arahnya dapat menggunakan kaedah tangan kanan seperti pada Gambar 5.7. Ibu jari sebagai arah  $I$ , empat jari lain sebagai arah  $B$  dan arah gaya Lorentz sesuai dengan arah telapak.

Besarnya gaya Lorentz sebanding dengan kuat arus  $I$ , induksi magnet  $B$  dan panjang kawat  $\ell$ . Jika  $B$  membentuk sudut  $\theta$  terhadap  $I$  akan memenuhi persamaan berikut.

$$F_L = B I \ell \sin \theta \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

dengan :  $F_L$  = gaya Lorentz (N)  
 $B$  = induksi magnet (wb/m<sup>2</sup>)  
 $I$  = kuat arus listrik (A)  
 $\ell$  = panjang kawat (m)  
 $\theta$  = sudut antara  $B$  dengan  $I$

### CONTOH 5.4

Sebuah kawat yang dialiri arus 3 A berada dalam medan magnet 0,5 tesla yang membentuk sudut 30°. Berapakah besar gaya Lorentz yang dirasakan kawat tersebut sepanjang 5 cm?

#### Penyelesaian

$$I = 3 \text{ A}$$

$$B = 0,5 \text{ tesla (1 tesla = 1 wb/m}^2\text{)}$$

$$\theta = 30^\circ$$

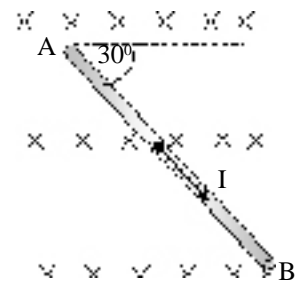
$$\ell = 5 \text{ cm} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

Gaya Lorentz memenuhi :

$$\begin{aligned} F_L &= B I \ell \sin 30^\circ \\ &= 0,5 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{2} \\ &= 3,75 \cdot 10^{-2} \text{ N} \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Sebuah kawat berada dalam medan magnet seperti *Gambar 5.8*. Medan magnet homogen  $2 \cdot 10^{-3} \text{ wb/m}^2$  masuk bidang gambar. Jika kawat dialiri arus 6 A dan panjang  $AB = 60 \text{ cm}$  maka tentukan besar dan arah gaya Lorentz yang dirasakan kawat AB.



**Gambar 5.8**

## 2. Kawat sejajar berarus

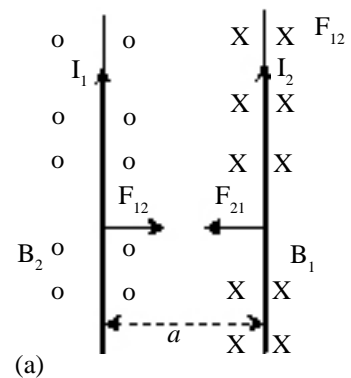
Di sekitar kawat berarus timbul induksi magnet. Apa yang akan terjadi jika kawat berarus lain didekatkan kawat pertama? Keadaan ini berarti ada dua kawat sejajar. Kawat kedua berada dalam induksi magnet kawat pertama, sehingga akan terjadi gaya Lorentz. Begitu juga pada kawat kedua akan menimbulkan gaya Lorentz pada kawat pertama. Gaya itu sama besar dan memenuhi persamaan berikut.

$$F_{21} = i_2 \ell B_1$$

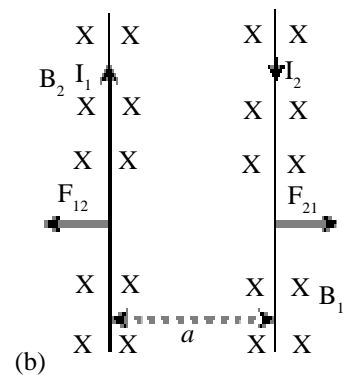
$$\text{dan } B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi a}$$

$$F_{21} = F_{12} = i_2 \ell \left( \frac{\mu_0 i_1}{2\pi a} \right) \dots\dots\dots (5.5)$$

Bagaimanakah arahnya? Kawat sejajar yang diberi arus searah akan tarik menarik dan diberi arus berlawanan akan tolak menolak. Perhatikan *Gambar 5.9*. Bagaimana hal ini bisa terjadi? Tentukan dengan menggunakan kaedah tangan kanan.



(a)



(b)

**Gambar 5.9**

Gaya Lorentz pada kawat sejajar.

### CONTOH 5.5

Diketahui dua buah kawat sejajar dialiri arus  $I_A = 2 \text{ A}$  dan  $I_B = 6 \text{ A}$  dengan arah berlawanan dan berjarak 8 cm. Tentukan gaya Lorentz yang dirasakan oleh kawat  $I_B$  sepanjang 20 cm karena pengaruh  $I_A$ !

#### Penyelesaian

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

$$I_B = 6 \text{ A}$$

$$a = 8 \text{ cm}$$

$$l = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$

Gaya Lorentz  $I_B$  oleh  $I_A$  memenuhi :

$$F_{BA} = i_B \ell B_A$$

$$\begin{aligned}
 &= i_B \ell \left( \frac{\mu_0 i_A}{2\pi a} \right) \\
 &= 6 \cdot 0,2 \left( \frac{4 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 8 \cdot 10^{-2}} \right) = 6 \cdot 10^{-6} \text{ N}
 \end{aligned}$$

Arahnya adalah tolak menolak karena arah arusnya sama.

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Dua kawat sejajar lurus panjang berjarak 20 cm satu sama lain. Kedua kawat dialiri arus masing-masing  $I_1 = 10\text{A}$  dan  $I_2 = 20\text{A}$  dengan arah berlawanan. Tentukan arah dan besar gaya Lorentz yang dialami kawat  $I_2$  sepanjang 50 cm!

### 3. Gaya Lorentz pada Muatan Bergerak

Muatan bergerak dapat disamakan dengan arus listrik. Berarti saat ada muatan bergerak dalam medan magnet juga akan timbul gaya Lorentz. Arus listrik adalah muatan yang bergerak dan muatan yang dimaksud adalah muatan positif.

Gaya Lorentz yang dirasakan muatan positif dapat ditentukan dengan kaedah tangan kanan. Perhatikan Gambar 5.10. Ibu jari menunjukkan arah  $v$ , 4 jari lain menjadi arah  $B$  dan telapak arah gaya Lorentz. Bagaimana dengan muatan negatif? Coba kalian pikirkan!

Gaya Lorentz yang dirasakan oleh muatan bergerak tersebut memenuhi persamaan berikut.

$$F = q v B \sin \theta \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

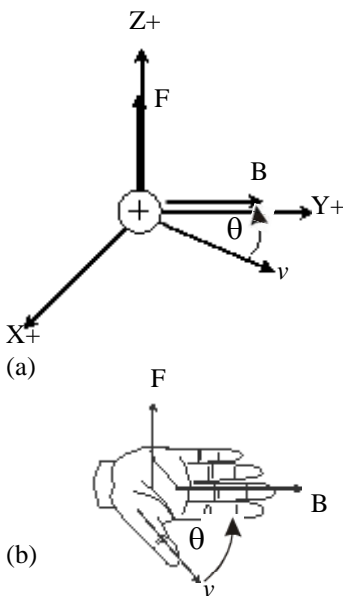
dengan :  $F$  = gaya Lorentz (N)

$q$  = muatan (C)

$v$  = kecepatan muatan (m/s)

$B$  = induksi magnet (wb/m<sup>2</sup>)

$\theta$  = sudut antara  $v$  dan  $B$



**Gambar 5.10**

(a) Pengaruh gaya Lorentz pada muatan bergerak (b) kaedah tangan kanan.

### CONTOH 5. 6

Sebuah partikel bermuatan  $+5\text{ }\mu\text{C}$  bergerak membentuk sudut  $30^\circ$  terhadap medan magnet homogen  $0,5\text{ Wb/m}^2$  dan kecepatan partikel  $4 \cdot 10^5\text{ m/s}$  maka tentukan gaya Lorentz yang bekerja pada partikel!

**Penyelesaian**

$$q = +5\text{ }\mu\text{C} = 5 \cdot 10^{-6}\text{ C}$$

$$\begin{aligned}v &= 4 \cdot 10^5 \text{ m/s} \\ \theta &= 30^\circ \\ B &= 0,5 \text{ Wb/m}^2\end{aligned}$$

Besar gaya Lorentz pada muatan itu memenuhi :

$$\begin{aligned}F &= q v B \sin \theta \\ &= 5 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^5 \cdot 0,5 \cdot \sin 30^\circ = 0,5 \text{ N}\end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Sebuah elektron ( $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ) bergerak dengan kecepatan 2000 m/s pada arah tegak lurus medan magnet 0,8 tesla. Tentukan gaya Lorentz yang dirasakan elektron tersebut!

### Pengaruh Nilai $\theta$

Perhatikan nilai gaya Lorent pada muatan yang bergerak.  $F = qvB \sin \theta$ . Nilai  $\theta$  ini memiliki tiga kemungkinan. Perhatikan ketiga kemungkinan tersebut.

(a) Nilai  $\theta = 0$ .

Nilai  $\theta = 0$  terjadi jika  $v$  sejajar  $B$  akibatnya nilai  $F = 0$ . Karena tidak dipengaruhi gaya maka muatannya akan bergerak *lurus beraturan (GLB)*.

(b) Nilai  $\theta = 90^\circ$ .

Nilai  $\theta = 90^\circ$  terjadi jika  $v$  tegak lurus  $B$ . Nilai  $F = q v B$  dan selalu tegak lurus dengan  $v$ . Keadaan ini menyebabkan akan terjadi *gerak melingkar beraturan (GMB)*. Jari-jarinya memenuhi persamaan berikut. Coba kalian pikirkan dari manakah dapat diperoleh.

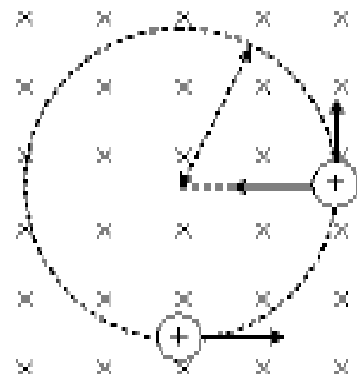
$$R = \frac{m v}{B q} \dots\dots\dots (6.11)$$

(c) Nilai  $0 < \theta < 90^\circ$ .

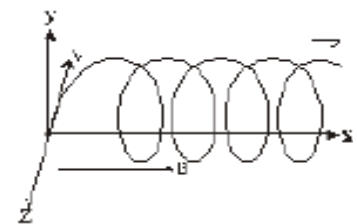
Nilai kemungkinan ketiga ini dapat menyebabkan terjadi perpaduan gerak GLB dan GMB dan terjadi gerak *helix*.

### Muatan bergerak di sekitar kawat berarus

Masih ingat induksi magnet ? Kawat yang dialiri arus dapat menimbulkan medan magnet berarti muatan yang bergerak di sekitar kawat berarus sama dengan bergerak dalam medan magnet yaitu akan merasakan gaya Lorentz. Untuk memahaminya dapat kalian perhatikan contoh berikut.



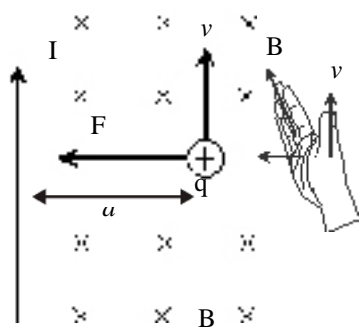
(a)



(b)

**Gambar 5.11**

- (a) Muatan bergerak melingkar dalam medan magnet.  
(b) Muatan positif bergerak helix karena pengaruh  $B$  searah sumbu  $X$



Gambar 5.12

**CONTOH 5.7**

Sebuah kawat lurus panjang dialiri arus listrik 2 A. Jika terdapat sebuah proton bergerak dengan kecepatan  $4 \times 10^4$  m/s searah arus dalam kawat pada jarak 2 cm dan muatan proton  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C, maka tentukan besar dan arah gaya Lorentz pada proton tersebut!

**Penyelesaian**

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

$$v = 4 \cdot 10^4 \text{ m/s}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$a = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$$

Arah gaya Lorentz dapat menggunakan kaedah tangan kanan dan hasilnya seperti pada Gambar 5.12.

Besar gaya Lorentz memenuhi :

$$F = q v B$$

$$= q v \left( \frac{\mu_0 i}{2 a} \right)$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot 10^4 \left( \frac{4 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 0,02} \right)$$

$$= 1,28 \cdot 10^{-19} \text{ N (mendekati kawat)}$$

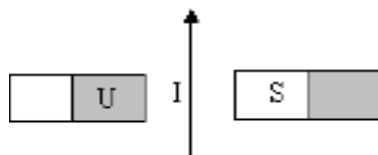
**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

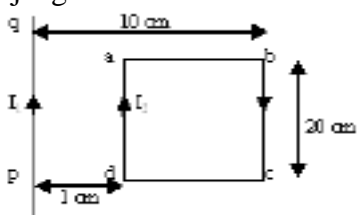
Sebuah penghantar lurus panjang dialiri arus listrik 4 A. Sebuah elektron bergerak dengan kecepatan  $2 \times 10^4$  m/s berlawanan arah arus dalam penghantar dengan jarak 0,05 m dari penghantar itu. Jika muatan elektron  $-1,6 \cdot 10^{-19}$  C, maka tentukan besar dan arah gaya Lorentz pada elektron tersebut!

**LATIHAN 5.2**

1. Arus listrik sebesar 4 A mengalir melalui kawat penghantar. Kawat tersebut tegak lurus suatu medan magnetik  $1,2 \text{ Wb/m}^2$ . Berapakah gaya Lorentz yang dirasakan pada kawat sepanjang 20 cm !
2. Diantara dua buah kutub magnet U dan S ditempatkan sebuah kawat

berarus listrik I. Kawat tersebut akan mendapat gaya Lorentz, tentukan arah gaya Lorentz tersebut!



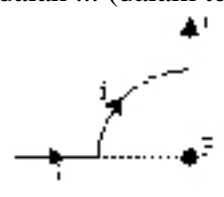
3. Pada dua buah kawat sejajar yang masing-masing dialiri arus listrik yang sama besar, timbul gaya yang besarnya  $2 \cdot 10^{-7}$  N/m. Jarak antara kedua kawat itu 1 meter. Berapakah besar arus dalam setiap kawat tersebut ?
  4. Pada gambar di bawah terlukis bahwa kawat panjang lurus pq dilalui arus listrik sebesar  $I_1 = 10$  A dan kawat empat persegi panjang abcd dilalui arus  $I_2 = 5$  A. Berapakah resultan gaya yang dialami kawat empat persegi panjang abcd ?
- 
5. Sebuah elektron bergerak dengan kecepatan  $2 \times 10^5$  ms<sup>-1</sup> searah sumbu Y+ memotong medan magnet  $0,8$  mWb/m<sup>2</sup> yang searah sumbu X+. Jika  $e = 1,6 \times 10^{-19}$  C, maka tentukan besar dan arah gaya yang bekerja pada electron tersebut !
  6. Suatu partikel alpha ( $m = 6,4 \cdot 10^{-27}$  kg dan  $q = 3,2 \cdot 10^{-19}$  C) bergerak tegak lurus terhadap medan magnet B yang arahnya masuk bidang gambar. Jika  $B = 0,5$  T dan kecepatan partikel  $4 \cdot 10^3$  m/s, maka tentukan jari-jari lintasannya !
  7. Sebuah partikel bermuatan  $+ 8 \mu\text{C}$  bergerak sejajar dengan kawat berarus listrik 10 A. Jika jarak partikel ke kawat 5 cm dan laju partikel 5 m/s searah arusnya, maka tentukan besar dan arah gaya yang dialami partikel !

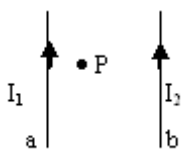
## Rangkuman Bab 5

1. Di sekitar kawat berarus timbul induksi magnet. Arahnya sesuai kaedah tangan kanan. Besarnya memenuhi :
  - a. Di sekitar kawat lurus panjang  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$
  - b. Di pusat lingkaran :  $B = \frac{\mu_0 I}{2a}$
  - c. Di tengah sumbu solenoida :  $B = \mu_0 I n$
2. Gaya Lorentz adalah gaya yang timbul akibat medan magnet.
  - a. Pada kawat berarus dalam medan magnet.
 
$$F = B i \ell \sin \theta$$
  - b. Pada kawat sejajar berarus
 
$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \ell$$
  - c. Muatan yang bergerak dalam medan magnet.
 
$$F = B q v \sin \theta$$

## Evaluasi Bab 5

Pilihlah jawaban yang benar pada soal – soal berikut dan kerjakan di buku tugas kalian.

- Medan magnet disekitar penghantar panjang lurus berarus, berbanding terbalik dengan ....
  - Kuat arus listrik
  - Tegangan listrik
  - Induktansi diri
  - Jumlah lilitan kumparan
  - Jarak titik dari penghantar
- Arus listrik sepanjang kawat listrik tegangan tinggi dari selatan ke utara. Arah medan magnet yang diakibatkan arus listrik di atas kawat tersebut adalah ke ....
  - Selatan
  - Utara
  - timur
  - barat
  - tenggara
- Sebuah kawat lurus yang panjang berarus listrik 10 ampere. Sebuah titik berada 4 cm dari kawat. Jika  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/Amp m}$ , maka kuat medan magnet di titik tersebut adalah ....
  - $0,5 \times 10^{-4} \text{ weber / m}^2$
  - $1,0 \times 10^{-4} \text{ weber / m}^2$
  - $3,14 \times 10^{-4} \text{ weber / m}^2$
  - $4,0 \times 10^{-4} \text{ weber / m}^2$
  - $5,0 \times 10^{-4} \text{ weber / m}^2$
- Dua kawat a dan b diletakkan sejajar pada jarak 8 cm satu sama lain (gambar di bawah). Tiap kawat dialiri arus sebesar 20 A. Jika  $\mu_0/4\pi = 10^{-7} \text{ Tm/A}$ , maka induksi magnet di titik P yang terletak di antara kedua kawat pada jarak 2 cm dari kawat a dalam mT adalah ....
  - 0,1
  - 0,13
  - 0,2
  - 0,25
  - 0,3
- Dua kawat yang sangat panjang dipasang vertikal sejajar dengan jarak d. Kawat pertama dialiri arus sebesar I ke atas. Pandang titik P (dalam bidang kedua kawat itu) yang terletak diantaranya dan berjarak  $1/3 d$  dari kawat pertama. Jika induksi magnet di titik P sama dengan nol, berarti arus yang mengalir dalam kawat kedua ....
  - $1/3 I$  ke bawah
  - $1/2 I$  ke bawah
  - $3 I$  ke atas
  - $2 I$  ke atas
  - $2 I$  ke bawah
- Kuat medan magnetik (induksi magnetik) di pusat kawat yang melingkar berjari-jari R meter dan berarus I ampere, bila  $m_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ weber ampere}^{-1} \text{ meter}^{-1}$  adalah ... (dalam tesla)
  - $\mu_0 i / (2R)$
  - $\mu_0 i / (2R^2)$
  - $\mu_0 i / (2\pi R)$
  - $\mu_0 i / (4\pi R)$
  - $\mu_0 i / (4\pi R^2)$
- Kawat  $1/4$  lingkaran dengan jari-jari 3 meter dialiri arus 6 ampere. Maka besar induksi magnet pada pusat lingkaran (P) adalah ... (dalam tesla)
  - $\pi \times 10^{-5}$
  - $\pi \times 10^{-7}$
  - $4\pi \times 10^{-5}$
  - $4\pi \times 10^{-7}$
  - $7\pi \times 10^{-7}$
- Kawat lurus panjang dan kawat melingkar dialiri arus sama besar 4 A. Keduanya
 



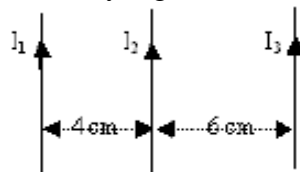
didekatkan tanpa bersentuhan seperti gambar. Jari-jari lingkaran 4 cm. Besar induksi magnet total yang timbul di pusat lingkaran ( titik P) adalah ....



- A.  $3,14 \cdot 10^{-5}$  tesla  
 B.  $4,14 \cdot 10^{-5}$  tesla  
 C.  $4,28 \cdot 10^{-5}$  tesla  
 D.  $5,28 \cdot 10^{-5}$  tesla  
 E.  $8,28 \cdot 10^{-5}$  tesla
9. Diantara besaran berikut :  
 (1) jumlah kumparan lilitan  
 (2) arus dalam kumparan  
 (3) panjang kumparan  
 (4) besar tegangan sumber  
 Yang menentukan nilai induksi magnetik dalam kumparan adalah....  
 A. 1, 2 dan 3      D. 1 dan 4  
 B. semua      E. 2 dan 4  
 C. 1 dan 3
10. Induksi magnetik pada solenoida menjadi bertambah besar, bila....  
 A. jumlah lilitannya diperbanyak, arusnya diperkecil  
 B. jumlah lilitannya dikurangi, arusnya diperbesar  
 C. jumlah lilitan diperbanyak, arus diperbesar  
 D. solenoidanya diperpanjang, arusnya diperbesar  
 E. solenoidanya diperpanjang, arusnya diperkecil
11. Perhatikan gambar berikut ini. Kawat yang panjangnya 50 cm, berarus listrik 2 A diletakkan pada medan magnet  $B = 5 \cdot 10^{-4}$  tesla. Gaya yang bekerja pada kawat adalah ....

- A.  $2,5 \cdot 10^{-4}$  N      x x x x x x x x x  
 B.  $2,5\sqrt{2} \cdot 10^{-4}$  N      x x **I = 2A** x x x  
 C.  $5 \cdot 10^{-4}$  N      x **B** x x x x x x x  
 D.  $5\sqrt{2} \cdot 10^{-4}$  N      x x x x x x x x x  
 E.  $5\sqrt{3} \cdot 10^{-4}$  N      x x x **45°** x x x x x

12. Dua buah kawat sejajar yang dilalui arus listrik yang sama besar dan arahnya akan....  
 A. saling tarik menarik  
 B. saling tolak menolak  
 C. tidak saling mempengaruhi  
 D. arus listriknya menjadi nol  
 E. arus listriknya menjadi dua kali lipat
13. Bila  $I_1 = I_3 = 4A$  dan  $I_2 = 3A$ , maka besar gaya Lorentz per satuan panjang pada kawat yang berarus  $I_2$  adalah ....



- A.  $8/3 \times 10^{-5}$  N/m  
 B.  $10^{-5}$  N/m  
 C.  $1/3 \times 10^{-5}$  N/m  
 D.  $10^{-4}$  N/m  
 E.  $2 \times 10^{-4}$  N/m
14. Sebuah kumparan empat persegi panjang dengan ukuran 24 cm x 10 cm memiliki 40 lilitan dan dialiri arus sebesar 3 ampere berada dalam suatu medan magnet serba sama sebesar  $0,5 \text{ W/m}^2$ . Besar momen kopel bila bidang kumparannya sejajar medan magnet adalah....  
 A.  $144 \times 10^0 \text{ Nm}$       D.  $144 \times 10^{-3} \text{ Nm}$   
 B.  $144 \times 10^{-1} \text{ Nm}$       E.  $144 \times 10^{-4} \text{ Nm}$   
 C.  $144 \times 10^{-2} \text{ Nm}$
15. Sebuah partikel dengan muatan sebesar  $1\mu\text{C}$  bergerak membentuk sudut  $30^\circ$  terhadap medan magnet homogen  $B = 10^{-4}$  tesla yang mempengaruhinya.



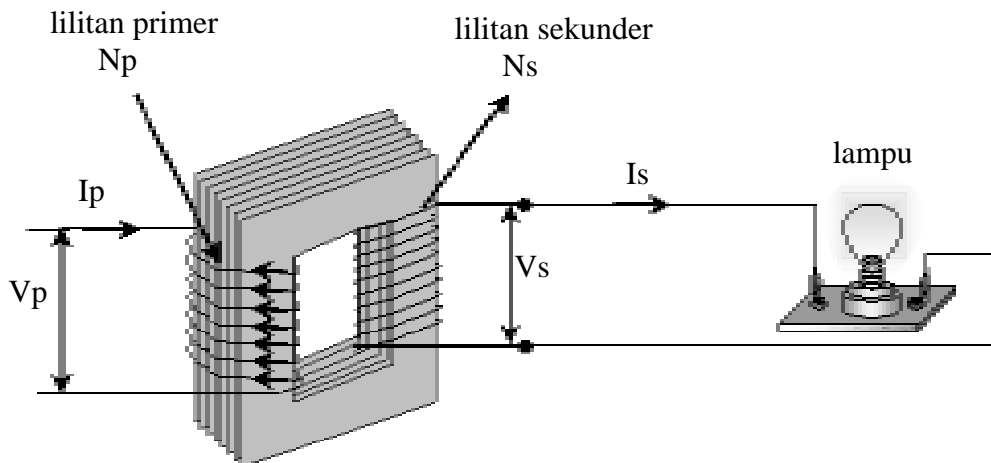
Kecepatan partikel tersebut 2000 m/s, maka gaya Lorentz yang dialaminya adalah ....

- A. nol  
B.  $2 \times 10^{-6}$  N  
C.  $4 \times 10^{-6}$  N
- D.  $10^{-7}$  N  
E.  $10^{-8}$  N
16. Sebuah elektron bergerak dengan kecepatan  $4 \times 10^5 \text{ ms}^{-1}$  searah sb. X+ memotong medan magnet  $5 \times 10^{-4} \text{ Wb m}^2$  searah sb. Z+. Bila  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ , besar dan arah gaya yang bekerja pada elektron adalah ....
- A.  $3,2 \times 10^{-17}$  N searah sb. Y-  
B.  $3,2 \times 10^{-17}$  N searah sb. Y+  
C.  $8 \times 10^{-22}$  N searah sb. Y-  
D.  $8 \times 10^{-22}$  N searah sb. Y+  
E.  $2 \times 10^{-28}$  N searah sb. Y-
17. Sebuah zarah bermuatan listrik bergerak dan masuk ke dalam medan magnet sedemikian rupa sehingga lintasannya berupa lingkaran dengan jari-jari 10 cm. Jika zarah lain bergerak dengan laju 1,2 kali zarah pertama, maka jari-jari lingkarannya 20 cm. Ini berarti bahwa perbandingan antara massa per muatan zarah pertama dengan zarah kedua adalah sebagai ....
- A. 3 : 5  
B. 4 : 5  
C. 1 : 2
- D. 5 : 6  
E. 5 : 4
18. Partikel  $\alpha$  bergerak dengan kecepatan  $v \text{ m/s}$  tegak lurus arah medan magnet B, lintasan yang dilalui berjari-jari R m. Partikel  $\text{H}^1$  bergerak
- ....
- A. 4 R m  
B. 2 R m  
C. R m
- D.  $\frac{1}{4}$  R m  
E.  $\frac{1}{2}$  R m
19. Sebuah muatan uji positif bergerak dekat kawat lurus panjang yang dialiri arus listrik I. Suatu gaya yang mempunyai arah menjauhi dari kawat akan terjadi pada muatan uji tersebut apabila arah gerakannya .....
- A. searah dengan arah arus  
B. berlawanan dengan arah arus  
C. mendekati kawat secara tegak lurus  
D. menjauhi kawat secara tegak lurus  
E. tegak lurus baik terhadap arah arus maupun terhadap arah menuju kawat
20. Sebuah penghantar lurus panjang dialiri arus listrik 1,5A. Sebuah elektron bergerak dengan kecepatan  $5 \times 10^4 \text{ ms}^{-1}$  searah arus dalam penghantar, pada jarak 0,1 m dari penghantar itu. Jika muatan electron itu  $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ , maka besar gaya pada electron oleh arus dalam penghantar itu adalah .....
- A.  $1,5 \times 10^{-20}$  N  
B.  $2,4 \times 10^{-20}$  N  
C.  $3,2 \times 10^{-19}$  N  
D.  $4,2 \times 10^{-19}$  N  
E.  $5,0 \times 10^{-19}$  N

B A B

6

## IMBAS ELEKTROMAGNETIK



Kalian banyak memanfaatkan alat-alat yang menggunakan prinsip imbas elektromagnetik. Misalnya seperti pada gambar diatas. Sebuah trafo sebagai alat penurun dan penaik tegangan contoh lain ada alat generator. Bagaimanakah prinsip dari imbas elektromagnetik? Bagaimana kerja trafo dan generator itu? Apa contoh alat-alat yang lain?

Semua pertanyaan diatas itulah yang dapat kalian pelajari pada bab ini. Oleh sebab itu setelah belajar bab ini kalian diharapkan dapat:

1. menerapkan hukum Faraday pada sumber-sumber ggl imbas,
2. menjelaskan prinsip kerja generator,
3. menentukan ggl induksi pada generator,
4. menerapkan diagram rasio pada penyelesaian tentang arus bolak-balik.

## A. Hukum Faraday

### 1. Hukum Faraday

Pada bab 5 kalian telah belajar induksi magnet. induksi magnet dapat terjadi dari kawat berarus listrik. Bisakah medan magnet menimbulkan arus listrik kembali. Keadaan sebaliknya inilah yang dipelajari oleh *Michael Faraday* (1791-1867) seorang ahli fisika berkebangsaan Inggris. Secara eksperimen Faraday menemukan bahwa beda potensial dapat dihasilkan pada ujung-ujung penghantar atau kumparan dengan memberikan perubahan fluks magnetik. Hasil eksperimennya dirumuskan sebagai berikut.

*“Ggl induksi yang timbul pada ujung-ujung suatu penghantar atau kumparan sebanding dengan laju perubahan fluks magnetik yang dilingkupi oleh loop penghantar atau kumparan tersebut.”*

Dari rumusan di atas dapat dituliskan menjadi persamaan seperti di bawah. Pembandingnya adalah jumlah lilitannya.

$$\varepsilon = - N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \dots\dots\dots(6.1)$$

dengan :  $\varepsilon$  = ggl induksi (volt)

$N$  = jumlah lilitan

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \text{laju perubahan fluks magnetik}$$

Apa arti tanda negatif itu ? Tanda negatif pada persamaan 6.1 sesuai dengan *Hukum Lenz*. Dengan bahasa yang sederhana hukum Lenz dirumuskan: *Ggl Induksi selalu membangkitkan arus yang medan magnetiknya berlawanan dengan sumber perubahan fluks magnetik.*

### CONTOH 6.1

Sebuah solenoida memiliki 1000 lilitan berada dalam medan magnetik sehingga solenoida dipengaruhi fluks magnetik sebesar  $4 \cdot 10^{-3}$  Wb. Jika fluks magnetiknya berubah menjadi  $3 \cdot 10^{-3}$  Wb dalam 2 sekon, maka tentukan besar ggl induksi yang timbul pada ujung-ujung solenoida tersebut?

#### Penyelesaian

$$N = 1000$$

$$\Delta\phi = 3 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3} = -10^{-3} \text{ Wb}$$

$$\Delta t = 2 \text{ s}$$

Ggl induksi yang timbul pada ujung-ujung solenoida memenuhi hukum Faraday dan dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \\ &= -1000 \frac{(-10^{-3})}{2} = 0,5 \text{ volt} \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Fluks magnetik pada suatu kumparan berubah dari  $5 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$  menjadi  $2 \cdot 10^{-2} \text{ Wb}$  selama 0,5 s. Jumlah lilitannya 2000. Berapakah beda potensial yang timbul pada ujung-ujung kumparan ?

Hukum Faraday memperkenalkan suatu besaran yang dinamakan fluks magnetik. Fluks magnetik ini menyatakan jumlah garis-garis gaya magnetik. Berkaitan dengan besaran ini, kuat medan magnet didefinisikan sebagai kerapatan garis-garis gaya magnet. Dari kedua definisi ini dapat dirumuskan hubungan sebagai berikut.

$$\phi = B A \cos \theta \quad \dots\dots\dots(6.2)$$

dengan :  $\phi$  = fluks magnetik (weber atau Wb)

$B$  = induksi magnetik ( $\text{Wb/m}^2$ )

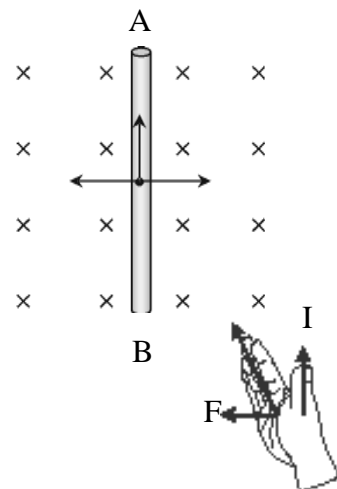
$A$  = luas penampang ( $\text{m}^2$ )

$\theta$  = sudut antara induksi magnet dengan normal bidang

Dari persamaan 6.2 dapat diamati bahwa perubahan fluks magnet dapat terjadi tiga kemungkinan. *Pertama* terjadi karena perubahan medan magnet  $B$ . *Kedua*, terjadi karena perubahan luas penampang yang dilalui, contohnya kawat yang bergerak dalam medan magnet. *Ketiga*, terjadi karena perubahan sudut  $\theta$ , contohnya kumparan yang berputar : *generator*. Perhatikan penjelasan perubahan-perubahan tersebut pada penjelasan berikut.

## 2. Penghantar bergerak dalam Medan Magnet

Penghantar bergerak dengan kecepatan  $v$  dalam medan magnet  $B$  dapat digambarkan seperti pada *Gambar 6.1*. Pada saat bergerak maka penghantar akan menyapu luasan yang terus berubah. Karena perubahan luas inilah maka ujung-ujung penghantar AB itu akan timbul beda potensial. Besarnya sesuai dengan hukum Faraday dan dapat



**Gambar 6.1.**

Jika penghantar bergerak dengan kecepatan  $v$  maka akan timbul gaya Lenz yang arahnya berlawanan sesuai dengan Hukum Lenz.

diturunkan seperti berikut.

$$\varepsilon = B l v \sin \theta \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

dengan  $\varepsilon$  = ggl induksi (volt)

$B$  = induksi magnet ( $\text{Wb/m}^2$ )

$l$  = panjang penghantar

$v$  = kecepatan gerak penghantar (m/s)

$\theta$  = sudut antara  $\theta$  dan  $v$ .

Arah arus yang ditimbulkan oleh beda potensial ini dapat menggunakan kaedah tangan kanan seperti pada *Gambar 6.1*. Ibu jari sebagai arah arus induksi  $I$ , empat jari lain sebagai arah  $B$  dan telapak sebagai arah gaya Lorentz yang berlawanan arah dengan arah kecepatan penghantar.

### CONTOH 6.2

Penghantar AB memiliki panjang 25 cm bergerak dengan kecepatan 5 m/s dalam medan magnet homogen 40 mT. Jika penghantar dihubungkan hambatan  $50 \Omega$  maka tentukan :

- besar kuat arus yang lewat R,
- gaya Lorentz yang timbul pada kawat!

#### Penyelesaian

$$l = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$$

$$v = 5 \text{ m/s}$$

$$B = 40 \text{ mT} = 0,04 \text{ T}$$

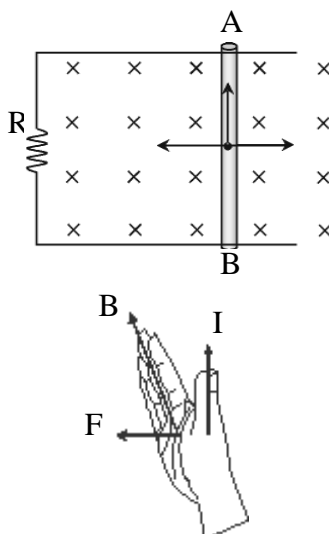
$$R = 50 \Omega$$

Ggl induksi ujung-ujung AB memenuhi :

$$\begin{aligned} \varepsilon &= B \cdot l \cdot v \\ &= 0,04 \cdot 0,25 \cdot 5 = 0,05 \text{ volt} \end{aligned}$$

- Kuat arus yang melalui hambatan R sebesar :

$$\begin{aligned} I &= \frac{\varepsilon}{R} \\ &= \frac{0,05}{50} = 0,0025 \text{ A atau } 2,5 \text{ mA} \end{aligned}$$



**Gambar 6.2**

Gaya Lorentz melawan  $v$  dan  $I$  ditentukan dengan kaedah tangan kanan. Ibu jari ke atas berarti  $I$  dari B ke A.

b. Gaya Lorentz yang timbul pada kawat sebesar :

$$\begin{aligned} F &= i \cdot \ell \cdot B \\ &= 0,0025 \cdot 0,25 \cdot 0,04 = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ N} \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Sebuah kawat digerakkan kelajuannya 20 m/s dalam medan magnet homogen  $0,8 \text{ Wb/m}^2$ . Panjang kawat 20 cm. Ujung-ujung penghantar kemudian dihubungkan pada lampu yang berhambatan  $40 \Omega$ . Jika lampu dapat menyala normal maka tentukan :

- beda potensial ujung-ujung kawat,
- kuat arus yang melalui lampu,
- daya lampu,
- gaya Lorentz yang bekerja pada kawat !

### Penting

Arah  $B_{\text{induksi}}$  ditentukan dari Hukum Lenz dan dapat dibuat kesimpulan :

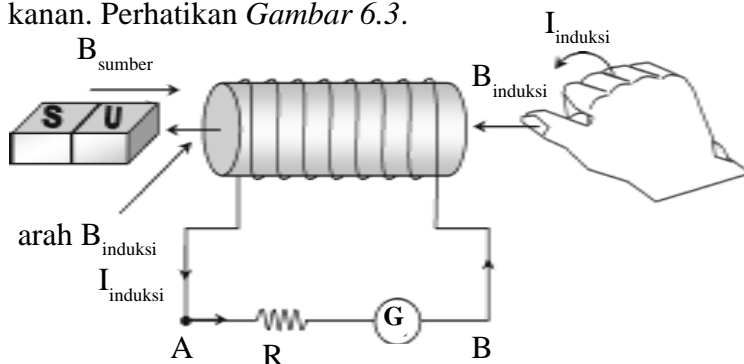
- Jika  $B_{\text{sumber}}$  bertambah maka  $B_{\text{induksi}}$  berlawanan  $B_{\text{sumber}}$
- Jika  $B_{\text{sumber}}$  berkurang maka  $B_{\text{induksi}}$  akan searah dengan  $B_{\text{sumber}}$

## 3. Perubahan Medan Magnet

Perubahan fluks yang kedua dapat terjadi karena perubahan medan magnet. Contoh perubahan induksi magnet ini adalah menggerakkan batang magnet di sekitar kumparan.

Sebuah batang magnet didekatkan pada kumparan dengan kutub utara terlebih dahulu. Pada saat ini ujung kumparan akan timbul perubahan medan magnet yang berasal dari batang magnet (medan magnet sumber). Medan magnetnya bertambah karena pada kutub utara garis-garis gaya magnetnya keluar berarti fluks magnet pada kumparan bertambah.

Sesuai dengan hukum Lenz maka akan timbul induksi magnet ( $B_{\text{induksi}}$ ) yang menentang sumber. Arah  $B_{\text{induksi}}$  ini dapat digunakan untuk menentukan arah arus induksi yaitu dengan menggunakan kaedah tangan kanan. Perhatikan *Gambar 6.3*.



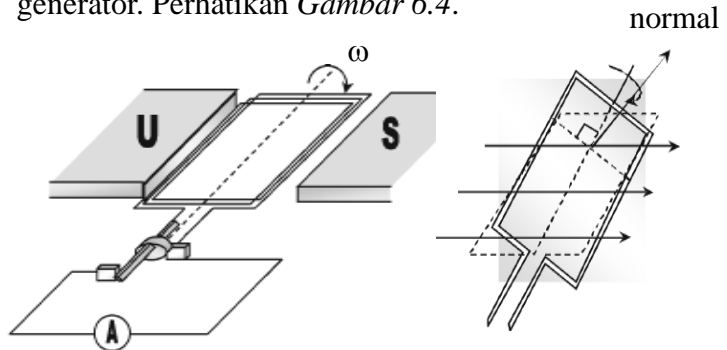
**Gambar 6.3**

Arus induksi karena perubahan medan magnet.

Timbulnya arus pada kumparan ini dapat ditunjukkan dari galvanometer yang dihubungkan dengan kumparan. Arus induksi ini timbul untuk menimbulkan induksi magnet ( $B_{\text{induksi}}$ ). Arah arus induksi sesuai kaedah tangan kanan, pada *Gambar 6.3* terlihat arus mengalir dari titik A ke titik B.

#### 4. Generator

*Generator* adalah alat yang dapat merubah energi gerak menjadi energi listrik. Prinsip yang digunakan adalah perubahan sudut berdasarkan hukum Faraday sehingga terjadi perubahan fluks magnetik. Perubahan sudut ini dirancang dengan cara memutar kumparan pada generator. Perhatikan *Gambar 6.4*.



**Gambar 6.4**

Model generator. Kumparan diputar disekitar medan magnet.

Pada ujung-ujung kumparan yang berputar diantara dua kutub magnet inilah akan timbul beda potensial. Sehingga dapat digunakan sebagai sumber tegangan dan hasilnya adalah sumber tegangan bolak-balik. Besar ggl induksinya dapat ditentukan dari hukum Faraday.

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \rightarrow \varepsilon = -N \frac{d}{dt} (BA \cos \omega t)$$

$$\varepsilon = -NBA\omega (-\sin \omega t) \rightarrow \varepsilon = -NBA\omega \sin \omega t$$

Dari hubungan ini dapat diperoleh :

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{maks}} \sin \omega t$$

$$\varepsilon_{\text{maks}} = N B A \omega \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

dengan :  $\varepsilon$  = ggl induksi (volt)

$N$  = jumlah lilitan

$B$  = induksi magnet ( $\text{Wb/m}^2$ )

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

$\omega$  = kecepatan sudut p (rad/s)

#### CONTOH 6.3

Kumparan berbentuk persegi panjang berukuran  $20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  memiliki 400 lilitan. Kumparan ini bersumbu putar tegak lurus medan magnet sebesar  $0,4 \text{ tesla}$ . Jika kumparan berputar dengan kecepatan sudut  $40 \text{ rad/s}$  maka tentukan ggl induksi maksimum kumparan !

### Penyelesaian

$$N = 400$$

$$A = 20 \times 10 \text{ cm}^2 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$B = 0,4 \text{ Wb/m}^2$$

$$\omega = 40 \text{ rad/s}$$

Ggl induksi maksimum kumparan sebesar :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\max} &= N B A \omega \\ &= 400 \cdot 0,4 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 40 = 128 \text{ volt} \end{aligned}$$

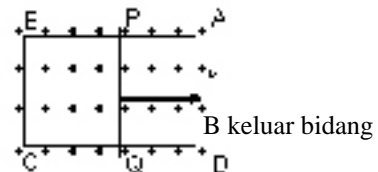
**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Generator memiliki kumparan berbentuk lingkaran dengan luas penampang  $10 \text{ m}^2$  berada dalam medan magnet homogen  $20 \text{ Wb/m}^2$ . Lilitannya sebanyak 8.000 lilitan. Pada saat kumparan berputar dengan kecepatan anguler  $30 \text{ rad/s}$  maka tentukan beda potensial maksimum yang dihasilkan di ujung-ujung generator!



## LATIHAN 6.1

- Sebuah cincin kawat dengan luas  $50 \text{ cm}^2$  terletak dalam medan magnetik yang induksi magnetiknya  $1,2 \text{ T}$ . Jika induksi magnetik  $B$  membentuk sudut  $30^\circ$  terhadap normal bidang cincin, tentukanlah besar fluks magnetik yang dilingkupi oleh cincin !
- Sebuah kumparan kawat terdiri atas 10 lilitan diletakkan di dalam medan magnet. Apabila fluks magnet yang dilingkupi berubah dari  $2 \cdot 10^{-4} \text{ Wb}$ . Menjadi  $10^{-4} \text{ Wb}$  dalam waktu 10 milli sekon, maka tentukan gaya gerak listrik induksi yang timbul !
- Bahan isolator ABCD yang berbentuk huruf U diletakkan dalam medan magnet homogen dengan induksi magnetik  $0,2 \text{ tesla}$  seperti gambar. Jika penghantar PQ yang panjangnya  $30 \text{ cm}$  digeser ke kanan dengan kecepatan tetap  $2 \text{ m s}^{-1}$ , maka tentukan besar ggl yang terjadi pada penghantar PQ dan arah arusnya !
- Tongkat konduktor yang panjangnya  $1 \text{ m}$  berputar dengan kecepatan sudut tetap sebesar  $10 \text{ rad/s}$  di dalam daerah bermedan magnet seragam  $B = 0,1 \text{ T}$ . Sumbu putaran tersebut melalui salah satu ujung tongkat dan sejajar arahnya dengan arah garis-garis medan magnet di atas. Berapakah GGL yang terinduksi antara kedua ujung tongkat ?
- Suatu kumparan terdiri dari 200 lilitan berbentuk persegi panjang dengan panjang  $10 \text{ cm}$  dan lebar  $5 \text{ cm}$ . Kumparan ini bersumbu putar tegak lurus medan magnet sebesar  $0,5 \text{ weber/m}^2$ , dan diputar dengan kecepatan sudut  $60 \text{ rad/s}$ . Pada ujung kumparan akan timbul GGL bolak-balik maksimum. Berapakah besarnya ?

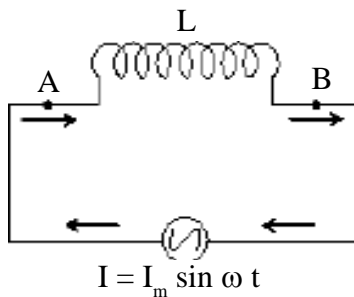




## B. Induksi Diri

### 1. Induktor

Masih ingat dengan solenoida ? Solenoida itulah yang dinamakan juga *induktor*. Pada Gambar 6.5 dapat kalian perhatikan rangkaian yang terdiri dari induktor dan sumber tegangan. Jika sumber tegangan yang digunakan adalah arus yang berubah ( arus AC) maka pada induktor itu akan terjadi perubahan induksi magnet (perubahan fluks). Dari perubahan itulah dapat menimbulkan beda potensial di titik A dan B. Ggl induksi yang disebabkan oleh dirinya sendiri ini disebut **induksi diri**.



**Gambar 6.5**

Rangkaian induktor dengan sumber arus bolak-balik.

Perubahan fluks magnetik pada kumparan diakibatkan oleh perubahan arus yang mengalir pada induktor. Besarnya sebanding dengan perubahan arus listrik tersebut. Pembandingnya disimbolkan  $L$  sehingga dapat diperoleh hubungan berikut.

$$\varepsilon = - L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad \dots\dots\dots(6.5)$$

dengan :  $\varepsilon$  = ggl induksi diri (volt)

$L$  = induktansi diri induktor ( henry )

$\frac{\Delta i}{\Delta t}$  = perubahan kuat arus tiap satu satuan waktu

Persamaan 6.5 diturunkan dari hukum Faraday tetapi perumusannya sesuai dengan perumusan *Joseph Henry* (1757-1878) seorang Fisikawan Amerika. Tetapi Henry terlambat mempublikasikan. Untuk penghargaan namanya dijadikan satuan induktansi induktor.

Untuk induktor yang berbentuk solenoida, induktansi induktornya dapat memenuhi persamaan berikut.

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} \quad \dots\dots\dots(6.6)$$

dengan :  $L$  = induktansi diri induktor ( henry )

$N$  = jumlah lilitan

$A$  = luas penampang induktor ( $m^2$ )

$\ell$  = panjang induktor (m)

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Wb} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

### CONTOH 6.4

Solenoida memiliki panjang  $5\pi$  cm dan lilitan 3000. Luas penampang  $4 \text{ cm}^2$ . Solenoida dialiri arus yang berubah dari 12 A menjadi 8 A dalam waktu 0,05 detik maka tentukan beda potensial yang timbul pada ujung-ujung solenoida ?

#### Penyelesaian

$$\ell = 5\pi \text{ cm} = 5\pi \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$N = 3000$$

$$A = 4 \text{ cm}^2 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\Delta i_1 = 8 - 12 = 6 \text{ A}$$

$$\Delta t = 0,05 \text{ detik}$$

Induktansi induktor solenoida memenuhi :

$$\begin{aligned} L &= \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} \\ &= \frac{4 \cdot 10^{-7} (3000)^2 4 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-2}} = 0,26 \text{ H} \end{aligned}$$

Beda potensial yang terjadi di ujung-ujung solenoida sebesar :

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -L \frac{\Delta i}{\Delta t} \\ &= -0,26 \frac{6}{0,05} = 31,2 \text{ volt} \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

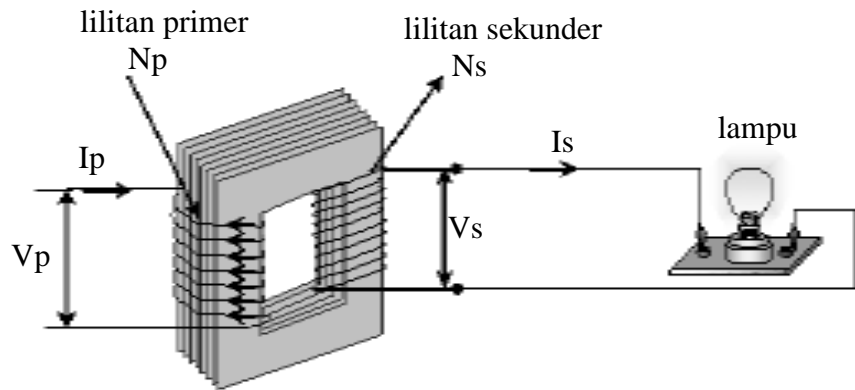
Sebuah induktor berbentuk solenoida panjangnya  $20\pi$  cm dibuat dengan melilitkan 1000 lilitan dan luas penampang  $2 \text{ cm}^2$ . Jika induktor tersebut dialiri arus yang berubah dari 8 A menjadi 2 A dalam waktu 10 ms maka tentukan :

- induktansi induktor,
- ggl induksi yang timbul pada induktor ?

## 2. Transformator

Kalian tentu sudah mengenal transformator. Di SMP kalian telah dikenalkan alat yang sering disebut **trafo** saja ini. Transformator dirancang dari dua kumparan untuk dapat menimbulkan induksi timbal balik. Perhatikan *Gambar 6.6*.

Manfaat trafo adalah untuk mengubah besarnya tegangan arus bolak-balik. Jika pada kumparan primernya dialiri arus bolak-balik.

**Gambar 6.6**

Tranformator memiliki dua komponen.

maka pada trafo akan terjadi induksi timbal balik dan akan timbul arus induksi pada kumparan skundernya. Kuat arus dan tegangan yang dihasilkan tergantung pada jumlah lilitannya.

Trafo yang menaikkan tegangan (*step up*) memiliki kumparan skunder lebih banyak sedangkan trafo penurun tegangan (*step down*) memiliki kumparan primer lebih banyak.

Pada trafo ini berlaku hubungan sebagai berikut.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad \eta = \frac{P_s}{P_p} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots(6.7)$$

dengan :  $V_p$  = tegangan primer (volt)  
 $V_s$  = tegangan sekunder (volt)  
 $P_p$  = daya primer (watt)  
 $P_s$  = daya sekunder (watt)  
 $\eta$  = efisiensi trafo (%)

### CONTOH 6.5

Sebuah trafo memiliki efisiensi 80%. Jumlah kumparan primernya 2000 lilitan sedang lilitan skundernya 1000 lilitan. Kumparan primernya dihubungkan pada sumber tegangan 220 volt. Jika saat diukur bagian skundernya mampu mengeluarkan arus 4 A maka tentukan :

- tegangan pada kumparan skundernya,
- kuat arus pada kumparan primernya !

#### Penyelesaian

$$\eta = 80 \%$$

$$N_p = 2000 \text{ dan } N_s = 1000$$

$V_p = 220$  volt dan  $I_s = 4$  A

- a. Tegangan skundernya memenuhi :

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

$$V_s = \frac{1000}{2000} \times 220 = 110 \text{ volt}$$

- b. Kuat arus primer dapat ditentukan dari persamaan efisiensi trafo sebagai berikut.

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} = \frac{V_s I_s}{V_p I_p}$$

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

$$\frac{80}{100} \cdot 220 \cdot I_p = 110 \cdot 4$$

$$I_p = 2,5 \text{ A}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Sebuah transformator mempunyai kumparan primer 200 lilitan dan skunder 800 lilitan. Jika arus skunder 3 A, tegangan primer 200 V dan efisiensi 75 %, maka berapakah :

- tegangan skundernya,
- arus primernya,
- daya yang hilang ?

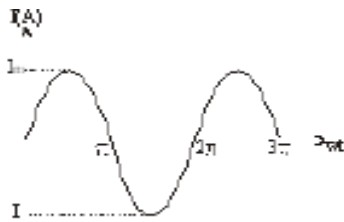


## **ATIHAN 6.2**

- Suatu kumparan dengan 600 lilitan dan induktansi diri 40 mH mengalami perubahan arus listrik dari 10 ampere menjadi 4 ampere dalam waktu 0,1 detik. Berapakah beda potensial antara ujung-ujung kumparan yang diakibatkannya ?
- Kumparan dengan 1000 lilitan diletakkan mengitari pusat solenoida yang panjangnya p m, luas penampangnya  $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ , dan solenoida terdiri atas 50.000 lilitan. Solenoida dialiri arus 10 A. Bila arus dalam solenoida diputus dalam waktu 0,1 detik, maka tentukan:
  - Induktansi induktornya,
  - ggl induksi ujung-ujung kumparan !
- Kuat arus listrik dalam suatu rangkaian tiba-tiba turun dari 10 A menjadi 2 A dalam waktu 0,1 detik. Selama peristiwa ini terjadi, timbul GGL induksi sebesar 32 V dalam rangkaian.
  - Hitunglah induktansi rangkaian !
  - Kita ingin mengubah tegangan AC 220 volt menjadi 110 volt dengan suatu transformator. Tegangan 220 volt tadi dihubungkan dengan kumparan primer yang mempunyai 1000 lilitan. Berapakah kumparan skundernya ?
  - Sebuah transformator step-up mengubah tegangan 20 volt menjadi 220 volt. Bila efisiensi trafo 80 % dan kumparan skundernya dihubungkan dengan lampu 220 volt, 80 watt, berapakah kuat arus yang mengalir pada kumparan primer ?
  - Sebuah toroida ideal, hampa, mempunyai 1000 lilitan dan jari-jari rata-ratanya 0,5 m. Kumparan yang terdiri atas 5 lilitan dililitkan pada toroida  $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  dan arus listrik pada kawat toroida berubah dari 7 A menjadi 9 A dalam satu detik maka tentukan g.g.l. imbas yang timbul pada kumparan !

## C. Rangkaian Arus Bolak-balik

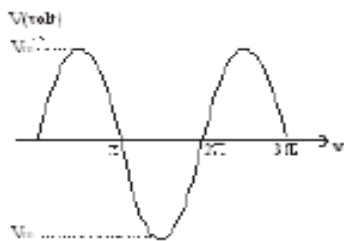
### 1. Nilai Efektif dan Maksimum



Arus listrik bolak-balik adalah arus listrik yang memiliki nilai sesaatnya berubah-ubah dari nilai negatif hingga positif. Nilai negatif inilah yang menunjukkan arah yang terbalik. Nilai yang sesuai dengan keadaan ini yang paling banyak digunakan adalah fungsi sinus. Kuat arus dan tegangan arus bolak-balik yang memenuhi fungsi sinus ini dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$i = I_m \sin \omega t$$

$$v = V_m \sin \omega t$$



Nilai yang termuat pada persamaan itu adalah **nilai maksimum**. Tetapi jika diukur dengan alat ukur ternyata memiliki nilai tersendiri. Nilai inilah yang terpakai dalam kerja komponen listrik dan dinamakan **nilai efektif**. Hubungan nilai maksimum dan nilai efektif ini memenuhi persamaan berikut.

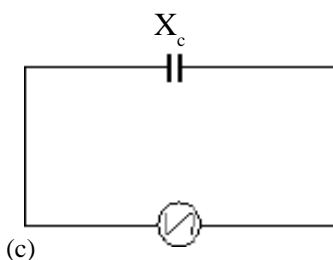
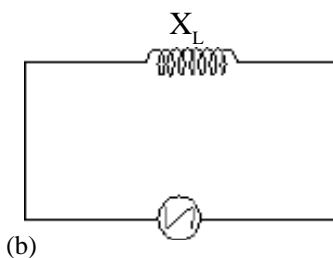
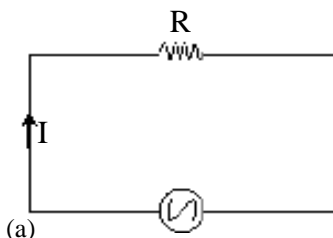
**Gambar 6.7**

Grafik I - t dan V - t arus AC

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

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

$$\dots\dots\dots (6.8)$$



### 2. Sifat-sifat Resistor, Induktor dan Kapasitor

Resistor, induktor dan kapasitor saat dilalui arus bolak-balik akan memiliki sifat-sifat yang berbeda. Sifat-sifat itu dapat dijelaskan sebagai berikut.

#### 1. Resistor

Jika sebuah resistor dialiri arus bolak-balik ternyata arus dan tegangannya tetap *sefase* ( $\phi = 0$ ). Nilai hambatannya tetap dan sering disebut *reaktansi resistif*. Sifat ini sama saja saat resistor dialiri arus searah (arus DC).

#### 2. Induktor

Sebuah induktor dialiri arus bolak-balik ternyata memiliki sifat yang berbeda dengan resistor. Arus bolak-balik yang melewati induktor akan ketinggalan fase  $\pi$  ( $90^\circ$ ) terhadap tegangannya. Atau sering dikatakan tegangannya mendahului arus  $90^\circ$  ( $\phi = +90^\circ$ ).

Jika induktor dihubungkan arus searah memiliki hambatan yang hampir nol, ternyata saat dialiri arus AC akan timbul hambatan yang dinamakan *reaktansi induktif*. Besarnya memenuhi persamaan berikut.

**Gambar 6.8**

$$X_L = \omega L \quad \dots\dots\dots (6.9)$$

dengan :  $X_L$  = reaktansi induktif ( $\Omega$ )  
 $\omega$  = frekuensi sudut (rad/s)  
 $L$  = induktansi induktor (H)

### c. Kapasitor

Ternyata kapasitor yang dialiri arus bolak-balik ternyata juga memiliki sifat yang berbeda dengan resistor dan induktor. Arus bolak-balik yang melewati induktor akan mendahului fase  $\pi$  ( $90^\circ$ ) terhadap tegangannya. Atau sering dikatakan tegangannya ketinggalan arus  $90^\circ$  ( $\phi = -90^\circ$ ).

Jika kapasitor dihubungkan arus searah memiliki hambatan tak hingga, ternyata saat dialiri arus AC akan timbul hambatan yang dinamakan **reaktansi kapasitif**. Besarnya memenuhi persamaan berikut.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad \dots\dots\dots (6.10)$$

dengan :  $X_C$  = reaktansi kapasitif ( $\Omega$ )  
 $\omega$  = frekuensi sudut (rad/s)  
 $C$  = kapasitas kapasitor (F)

Pada saat menganalisa rangkaian dengan sumber tegangan AC masih berlaku hukum Ohm. Tetapi sifat-sifat hambatannya memiliki fase. Cermatilah setiap contoh yang ada.

### CONTOH 6.6

Sebuah induktor dengan induktansi  $L = 0,8$  henry dialiri arus listrik bolak-balik yang nilainya memenuhi :  $i = 10 \sin 50 t$ . Tentukan nilai sesaat tegangan ujung-ujung induktornya!

#### Penyelesaian

$L = 0,8$  henry  
 $i = 10 \sin 50 t$

Dari nilai  $i$  ini dapat diperoleh :  
frekuensi sudutnya  $\omega = 50 \text{ rad/s}$

reaktansi induktifnya memenuhi :

$$\begin{aligned} X_L &= \omega L \\ &= 50 \cdot 0,8 = 40 \, \Omega \end{aligned}$$

Tegangan ujung-ujung induktor dapat diperoleh dari hukum Ohm sebagai berikut.

$$\begin{aligned} V_m &= X_L I_m \\ &= 40 \cdot 10 = 400 \text{ volt} \end{aligned}$$

dan nilai sesaatnya memiliki fase  $90^\circ$  lebih besar dibanding arusnya, yaitu :

$$\begin{aligned} v &= V_m \sin (50 t + \varphi) \\ v &= 400 \sin (50 t + 90^\circ) \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

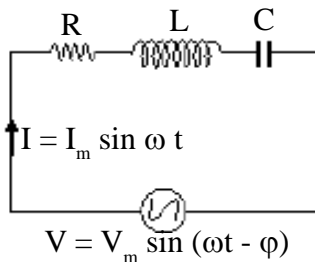
Sebuah kapasitor murni  $1 \, \mu\text{F}$  dialiri arus listrik yang berubah-ubah sesuai persamaan :  $i = 5 \sin 100 t$  ampere. Tentukan nilai sesaat tegangan ujung-ujung kapasitornya!

### 3. Rangkaian RLC Seri

Masih ingat rangkaian seri di kelas X ? Pada saat ini kalian dikenalkan kembali pada rangkaian seri yaitu rangkaian RLC seri yang dialiri arus bolak-balik. Sifat rangkaian RLC seri adalah arus yang melintasi R, L dan C akan sama. Sama disini berarti nilainya sama dan fasenya juga sama. Sedangkan untuk tegangannya berbeda yang berarti berbeda fase dan nilainya. Perhatikan rangkaian RLC seri pada *Gambar 6.8*. Jika pada rangkaian di aliri arus bolak-balik maka arus dan tegangan tiap-tiap komponennya dapat dituliskan sebagai berikut. Ingat sifat tiap komponennya.

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin \omega t \\ V_R &= V_{Rm} \sin \omega t \\ V_m &= V_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ) \\ V_C &= V_{Cm} \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

Untuk menentukan hubungan tiap-tiap besaran ini dapat digunakan analisa vektor dengan fase sebagai arahnya.



**Gambar 6.8**  
Rangkaian RLC seri.

Analisa ini dinamakan **FASOR** (Fase Vektor). Dengan analisa fasor ini dapat digambarkan hubungan arus dan tegangan pada masing-masing komponen seperti pada *Gambar 6.9*. Untuk tegangannya dapat diwakili reaktansinya.

Dari diagram fasor itu dapat berlaku hubungan matematis seperti berikut.

$$V^2 = V_R^2 + (V_L - V_C)^2 \quad \dots\dots\dots (6.11)$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{V_L - V_C}{V_R}$$

Jika dihubungkan dengan hukum Ohm maka dari persamaan di atas dapat di bagi dengan kuat arus kuadratnya sehingga diperoleh hambatan pengganti. Hambatan pengganti pada rangkaian AC ini dinamakan **impedansi**. Impedansi juga dapat diperoleh dari diagram fasor pada *Gambar 6.8(b)*.

$$Z^2 = R^2 + (X_L - X_C)^2 \quad \dots\dots\dots (6.12)$$

### Keadaan Resonansi

Coba kalian perhatikan kembali nilai  $\text{tg } \varphi$ . Saat nilai  $\text{tg } \varphi = 0$  itulah dinamakan terjadi keadaan resonansi. Keadaan ini bisa terjadi jika memenuhi :

- ♦  $V_L = V_C$
- ♦  $X_L = X_C$
- ♦  $Z = R$
- ♦ akan memiliki frekuensi resonansi sebesar :

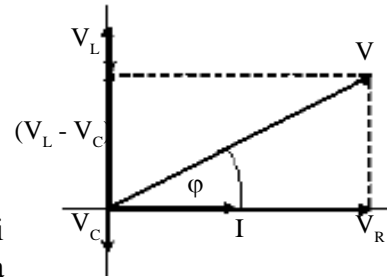
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \dots\dots\dots (6.13)$$

### Daya Arus Bolak-balik

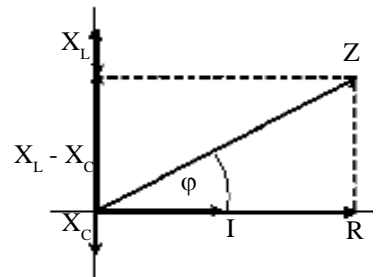
Pada saat dialiri arus bolak-balik, komponen-komponen listrik akan menyerap energi dengan daya yang diserap memenuhi persamaan berikut.

$$P = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \cos \varphi \quad \dots\dots\dots (6.14)$$

$\cos \varphi$  disebut dengan faktor daya. Nilai  $\cos \varphi$  dapat ditentukan dari diagram fasor.



(a)

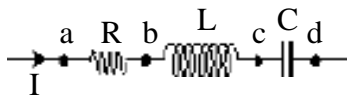


(b)

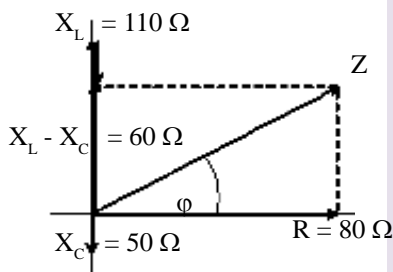
**Gambar 6.9**

(a) Fasor tegangan dan arus  
(b) Fasor hambatan dan arus.





**Gambar 6.10**  
RLC seri



**Gambar 6.11**  
fasor hambatan

### CONTOH 6.7

Perhatikan rangkaian pada *Gambar 6.10*. RLC dirangkai seri. Resistor  $80 \, \Omega$ , induktor  $1,1 \, \text{H}$  dan kapasitor  $0,2 \, \text{mF}$ . Pada rangkaian tersebut dialiri arus listrik bolak balik dengan frekuensi  $100 \, \text{rad/s}$ . Jika diketahui  $V_{bc} = 200 \, \text{volt}$ , maka tentukan:

- impedansi rangkaian,
- arus efektif yang mengalir pada rangkaian,
- tegangan efektif  $V_{ad}$ ,
- beda fase antara tegangan  $V_{ad}$  dengan arus yang melewati rangkaian,
- daya yang diserap rangkaian !

#### Penyelesaian

$$R = 80 \, \Omega$$

$$\omega = 100 \, \text{rad/s}$$

$$L = 1,1 \, \text{H}$$

$$C = 0,2 \, \text{mF} = 2 \cdot 10^{-4} \, \text{F}$$

Reaktansi induktif :

$$X_L = \omega L = 100 \cdot 1,1 = 110 \, \Omega$$

Reaktansi kapasitif :

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{100 \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = 50 \, \Omega$$

- Impedansi rangkaian diselesaikan diagram fasor hambatan (ingat  $V \sim R$ ). Lihat *Gambar 6.11*. Dari diagram fasor tersebut dapat diperoleh impedansi:

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{80^2 + (60)^2} \\ &= 100 \, \Omega \end{aligned}$$

- Kuat arus efektif

$$V_{bc} = V_L = 200 \, \text{volt}$$

$$X_L = 110 \, \Omega$$

sesuai hukum Ohm maka arus efektifnya dapat ditentukan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} V_L &= I X_L \\ 220 &= I \cdot 110 \\ I &= 2 \, \text{A} \end{aligned}$$

- Tegangan efektif  $V_{ad}$  dapat ditentukan dari kuat arus dan impedansinya.

$$\begin{aligned} V_{ad} &= I \cdot Z \\ &= 2 \cdot 100 = 200 \text{ volt} \end{aligned}$$

- d. Beda fase antara  $V$  dan  $i$  sebesar :

$$\begin{aligned} \tan \varphi &= \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{60 - 80}{3} \\ &= -\frac{20}{3} \\ \varphi &= -37^\circ \end{aligned}$$

- e. Daya yang diserap rangkaian memenuhi :

$$\begin{aligned} P &= V_{ad} \cdot I \cdot \cos \varphi \\ &= 200 \cdot 2 \cdot \cos (-37^\circ) = 320 \text{ watt} \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

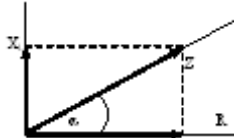
Rangkaian RLC seri terdiri dari hambatan  $400 \, \Omega$ , kumparan  $0,2$  henry dan kapasitor  $2$  mikrofard dirangkakan secara seri. Kemudian ujung-ujung rangkaian tersebut dihubungkan pada tegangan arus bolak balik  $v = 200 \sin 1000 t$ . Tentukan :

- impedansi rangkaian,
- kuat arus maksimum yang melewati rangkaian,
- tegangan maksimum antaranya ujung-ujung tiap komponen,
- beda fase antara  $v$  dan  $i$ ,
- daya yang diserap rangkaian !



### LATIHAN 6.3

- Dalam rangkaian seri  $R - L$ , hambatan  $120 \, \Omega$  dihubungkan ke tegangan bolak-balik yang dialiri arus  $2 \text{ A}$ . Apabila menghasilkan diagram vector seperti di bawah ini, ( $\tan \alpha = \frac{3}{4}$ ) maka tentukan tegangan inductor !



- Suatu kumparan bila dihubungkan dengan kutub-kutub sumber arus searah  $120 \text{ V}$ , maka akan menghasilkan kuat arus  $4 \text{ A}$ . Jika dihubungkan ke kutub-kutub sumber tegangan bolak-balik untuk menghasilkan kuat arus  $4 \text{ A}$  diperlukan tegangan  $200 \text{ V}$ . Jika frekuensi tegangan bolak-balik  $\frac{100}{\pi} \text{ Hz}$ , maka berapakah induktansi kumparan ?
- Hambatan  $1000 \, \Omega$ , kumparan  $0,5$  henry, kapasitas  $0,2$  mikrofard dirangkakan seri dan dihubungkan dengan sumber tegangan arus bolak-balik yang frekuensi angulernya  $5000 \text{ rad/s}$ . tentukan harga impedansi tersebut !
- Dalam suatu rangkaian, arus bolak-balik mengalir melalui resistor  $8 \, \Omega$ , inductor dengan reaktansi  $X_L = 4 \, \Omega$ , kapasitor dengan reaktansi  $X_C = 10 \, \Omega$ , seperti pada gambar. Bila  $V_{bc} = 24 \text{ V}$  maka tentukan :
  - impedansi rangkaian,
  - kuat arus yang lewat rangkaian,
  - tegangan  $V_{ad}$ ,
  - daya yang diserap rangkaian !
- Suatu rangkaian seri  $R-L-C$  dipasang pada tegangan listrik bolak-balik yang nilai efektifnya  $100 \text{ V}$  dan frekuensinya  $60 \text{ Hz}$ . Bila  $R = 10 \, \Omega$ ,  $L = 26,5 \text{ mH}$  dan  $C = 106 \text{ mF}$  maka tentukan beda potensial (tegangan) dalam volt antara ujung-ujung  $L$ !

## Rangkuman Bab 6

1. GGL induksi bisa timbul jika ada perubahan fluks magnetik sesuai hukum Faraday.

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \rightarrow \phi = B A \cos \theta$$

- a. penghantar bergerak dalam medan magnet  
 $\varepsilon = B l v \sin \theta$   
 arahnya sesuai kaedah tangan kanan

- b. Generator

$$\varepsilon_{\max} = N B A \omega$$

2. Jika sebuah induktor dialiri arus AC maka ujung-ujungnya timbul ggl induksi diri.

$$\varepsilon = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} \rightarrow L = \text{induksi diri (H)}$$

3. Jika ada dua kumparan terjadi induksi silang. Contoh transformator. Berlaku:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \rightarrow \frac{P_s}{P_p} \times 100\%$$

4. Arus bolak-balik adalah arus atau tegangan yang berubah-ubah nilainya dari nilai positif hingga negatif.

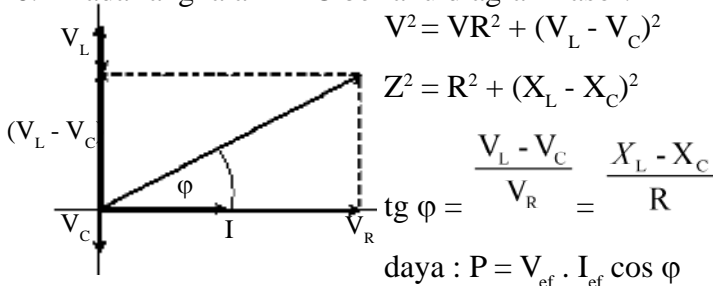
$$v = V_m \sin \omega t \quad V_{\text{ef}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad \text{dan} \quad I_{\text{ef}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

5. Sifat rangkaian :

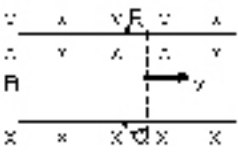
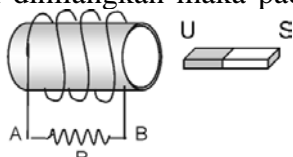
- a. Resistor :  $v$  sefase  $I$  ( $\phi = 0$ )
- b. Induktor :
  - ♦  $v$  mendahului  $I$   $90^\circ$  ( $\phi = +90^\circ$ )
  - ♦ reaktansi induktif  $X_L = \omega L$
- c. Kapasitans :
  - ♦  $v$  ketinggalan  $I$   $90^\circ$  ( $\phi = -90^\circ$ )

$$\text{♦ reaktansi kapasitif } X_C = \frac{1}{\omega C}$$

6. Pada rangkaian RLC berlaku diagram fasor:



## Evaluasi Bab 6

- Sebuah kumparan terdiri dari 1200 lilitan berada dalam medan magnetik, apabila pada kumparan terjadi perubahan flux magnetik  $2 \times 10^{-3}$  Wb setiap detik, maka besarnya ggl induksi yang timbul pada ujung-ujung kumparan adalah ....
  - 0,24 volt
  - 1,0 volt
  - 1,2 volt
  - 2,0 volt
  - 2,4 volt
- Sebuah penghantar berbentuk U terletak didalam daerah berinduksi magnetic homogen  $B = 4 \times 10^{-3}$  tesla, seperti terlihat pada gambar. Penghantar PQ sepanjang 40 cm menempel pada penghantar U dan digerakkan kekanan dengan kecepatan tetap  $v = 10$  m/s. Diantara ujung-ujung penghantar PQ timbul GGL induksi yang besarnya ....
  - $0,8 \times 10^{-2}$  volt
  - $1,6 \times 10^{-2}$  volt
  - $0,8 \times 10^{-1}$  volt
  - $1,6 \times 10^{-1}$  volt
  - 1,6 volt
- Jika batang magnet pada posisi di bawah dihilangkan maka pada akan ....
 
  - tidak timbul GGL pada AB
  - $V_A > V_B$
  - Mengalir arus pada R dari B ke A
  - Mengalir arus pada kumparan dari B ke A

yang mempengaruhi gaya gerak listrik induksi pada kumparan adalah ....

  - 1 saja
  - 1 dan 2
  - 2 saja
  - 2 dan 4
  - 3 saja
- Sebuah kumparan terdiri dari 20 lilitan dengan luas  $300 \text{ cm}^2$ , berada dalam medan magnet yang besarnya  $6 \cdot 10^{-4} \text{ Wb/m}^2$ . Jika medan magnetiknya berubah secara tetap hingga nol selama 0,01 detik, maka ggl induksi yang timbul sebesar ....
  - 0,036 volt
  - 0,36 volt
  - 0,18 volt
  - 0,012 volt
  - 0,12 volt
- Sebuah kumparan terdiri atas 1.000 lilitan dengan teras kayu berdiameter 4 cm. Kumparan tersebut memiliki hambatan  $400 \Omega$  dan dihubungkan seri dengan galvanometer yang hambatan dalamnya  $200 \Omega$ . Apabila medan magnetic  $B = 0,015$  tesla yang dililiti kumparan dengan garis medan sejajar batang kayu tiba-tiba dihilangkan, maka jumlah muatan listrik (dalam coulomb) yang mengalir lewat galvanometer adalah ....
  - $\frac{1}{2} \pi \times 10^{-5}$
  - $\pi \times 10^{-5}$
  - $4\pi \times 10^{-5}$
  - $6\pi \times 10^{-5}$
  - $8\pi \times 10^{-5}$
- Diantara faktor-faktor berikut :
  - jumlah lilitan kumparan
  - laju perubahan fluks magnetik
  - hambatan luar

yang mempengaruhi gaya gerak listrik induksi pada kumparan adalah ....

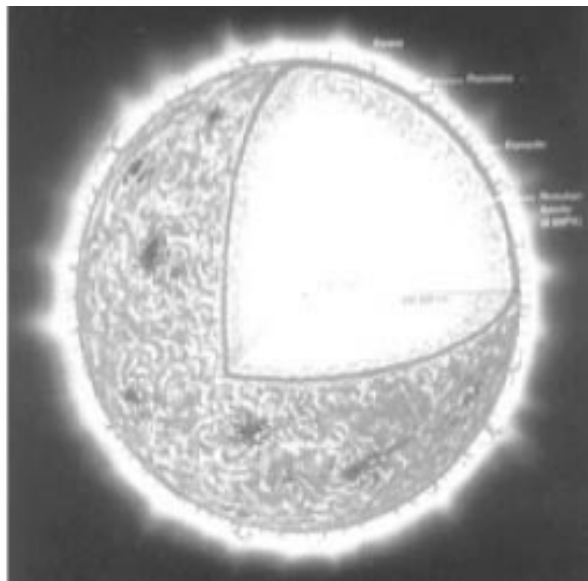
  - 1 saja
  - 1 dan 2
  - 2 saja
  - 2 dan 3
  - 3 saja
- Generator memiliki kumparan 100 lilitan berbentuk lingkaran dengan jari-jari  $10/\sqrt{\pi}$  cm. Kumparan ini bersumbu putar tegak lurus medan magnet sebesar  $0,25 \text{ weber/m}^2$ , dan diputar dengan kecepatan sudut  $120 \text{ rad/s}$ . Pada ujung kumparan akan timbul GGL bolak-balik maksimum sebesar ... volt.
  - 5
  - 30
  - 60
  - 120
  - 220

8. Agar GGL maksimum yang dihasilkan oleh generator menjadi 2 x semula ialah ....
- frekuensi putarnya dijadikan  $\frac{1}{2}$  x semula
  - aperiode putaranya dijadikan  $\frac{1}{2}$  x semula
  - jumlah lilitan dijadikan  $\frac{1}{2}$  x semula
  - luas penampang dan jumlah lilitan dijadikan 2 x semula
  - kawat kumparan diganti dengan kawat lain yang tebalnya 2 x semula
9. Sebuah kumparan (solenoid) mempunyai induktansi 500 mH. Besar ggl induksi dari yang dibangkitkan dalam kumparan itu jika ada perubahan arus listrik dari 100 mA menjadi 40 mA dalam waktu 0,01 detik secara beraturan sama dengan ....
- 3 mV
  - 300 mV
  - 3 V
  - 30 V
  - 300 V
10. Sebuah transformator digunakan untuk menghubungkan sebuah alat listrik 6 volt AC dan tegangan sumber 120 volt AC. Bila kumparan skunder transformator terdiri dari 40 lilitan maka jumlah lilitan kumparan primer transformator adalah ....
- 200
  - 400
  - 800
  - 1000
  - 1200
11. Perbandingan jumlah lilitan kawat pada kumparan primer dan skunder sebuah transformator adalah 1 : 4. Tegangan dan kuat arus masukannya masing-masing 10 V dan 2 A. Jika daya rata-rata yang berubah menjadi kalor pada transformator tersebut adalah 4 W dan tegangan keluarannya adalah 40 V, maka kuat arus keluarannya bernilai :
- 0,1 A
  - 0,4 A
  - 0,5 A
  - 0,6 A
  - 0,8 A
12. Sebuah transformator yang efisiensinya 75% dan dihubungkan dengan tegangan primer 220 volt, menghasilkan tegangan skunder 110 volt. Jika arus pada kumparan skunder sebesar 2 A, maka arus pada kumparan primer adalah .... (dalam ampere)
- 0,75
  - 0,80
  - 1,00
  - 1,20
  - 1,33
13. Tegangan listrik maksimum dari PLN  $220\sqrt{2}$  volt. Bila diukur dengan multimeter, tegangan efektifnya sebesar ....
- 110 volt
  - 110 volt
  - 220 volt
  - 220 volt
  - 240 volt
14. Reaktansi induktif sebuah inductor akan mengecil, bila ....
- frekuensi arusnya diperbesar, induktansi induktor diperbesar
  - frekuensi arusnya diperbesar, induktansi induktor diperkecil
  - frekuensi arusnya diperbesar, arus listrik diperkecil
  - frekuensi arusnya diperkecil, induktansi induktor diperbesar
  - frekuensi arusnya diperkecil, induktansi induktor diperkecil
15. Sebuah resistor R dan sebuah kumparan L dihubungkan seri pada tegangan bolak-balik 100 V. Tegangan antara kedua ujung kumparan dan resistor sama besar. Tegangan tersebut ...V.
- 25
  - 50
  - $50\sqrt{2}$
  - 60
  - 75
16. Suatu kumparan bila dihubungkan dengan kutub-kutub sumber arus searah 200 V menghasilkan arus 4 ampere. Bila kumparan dihubungkan pada arus bolak-balik maka untuk menghasilkan arus yang sama diperlukan tegangan 200 V. Jika frekuensi arus bolak-balik 50 Hz, maka induktansi kumparan adalah ... Henry.
- $\frac{0,2}{\pi}$
  - 0,2
  - $\frac{0,1}{\pi}$
  - 0,4
  - $\frac{0,4}{\pi}$

**B A B**

**7**

# **RADIASI BENDA HI-TAM**



Sumber: [www.alam.leoniko.or.id](http://www.alam.leoniko.or.id)

Energi yang sangat besar saat ini adalah energi dari cahaya matahari. Cahaya matahari inilah yang merupakan contoh radiasi benda hitam yang dapat memunculkan energi sampai bumi. Mengapa benda bisa mengalami radiasi? Besaran-besaran apa saja yang mempengaruhi radiasi? Bagaimana teori-teori yang mendukung?

Pertanyaan-pertanyaan diatas yang dapat kalian pelajari pada bab ini oleh sebab itu setelah belajar bab ini diharapkan kalian dapat :

1. menentukan faktor-faktor yang mempengaruhi radiasi benda,
2. menentukan pengaruh suhu benda terhadap intensitas dan daya radiasi,
3. menjelaskan pergeseran Wien,
4. menentukan energi gelombang elektromagnetik berdasarkan teori kuantum planck.

## A. Radiasi Kalor

Di kelas X kalian telah belajar 3 cara perambatan kalor yaitu : konduksi, konveksi dan radiasi. Pada bab ini akan dibahas lebih dalam bagaimana energi dapat diradiasikan. *Radiasi dapat didefinisikan sebagai pancaran energi tanpa membutuhkan medium atau perantara sebagai akibat suhu.* Peristiwa radiasi ini telah banyak dipelajari oleh ilmuwan fisika diantaranya seperti di bawah.

### 1. Hukum Stefan-Boltzmann

*Josef Stefan* (1835-1873) seorang ahli fisika Austria, dapat menunjukkan gejala radiasi benda hitam melalui eksperimen. Hubungannya adalah daya total per satuan luas yang dipancarkan pada semua frekuensi oleh benda hitam sebanding dengan pangkat empat suhu mutlaknya.

Melalui pengukuran langsung juga diketahui bahwa radiasi dipengaruhi oleh sifat warna benda. Besaran ini dinamakan *koefisien emisivitas*, disimbolkan  $e$ . Benda hitam sempurna memiliki  $e = 1$ , benda putih sempurna  $e = 0$  dan benda-benda lain memiliki rentang 0 - 1.

Penemuan Stefan diperkuat oleh *Boltzmann*, kemudian dikenal sebagai *hukum Stefan-Boltzmann*. Dan konstanta pembanding universal  $\sigma$  dinamakan konstanta *Stefan-Boltzmann*. Persamaannya dapat dituliskan seperti di bawah.

$$\begin{aligned} I &= e \sigma T^4 \\ P &= I \cdot A \\ E &= P \cdot t \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(7.1)$$

dengan :  $I$  = intensitas radiasi ( watt/m<sup>2</sup>)  
 $P$  = daya radiasi (watt)  
 $E$  = energi radiasi (joule)  
 $T$  = suhu mutlak benda (K)  
 $A$  = luas penampang (m<sup>2</sup>)  
 $t$  = waktu radiasi (s)  
 $\sigma$  = konstanta Stefan-Boltzmann (5,67.10<sup>-8</sup> Wm<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>)

### CONTOH 7.1

Suatu benda hitam memiliki suhu 27°C dan mengalami radiasi dengan intensitas 4.10<sup>2</sup> watt/m<sup>2</sup>. Luas penampang benda itu 5.10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup> Tentukan :

- daya radiasinya,
- energi radiasi selama 5 sekon,
- intensitas radiasinya jika benda tersebut dipanasi hingga suhunya mencapai 327° C !

#### Penyelesaian

$$A = 5.10^{-4} \text{ m}^2$$

$$T_1 = 27^\circ \text{ C} + 273 = 300 \text{ K}$$

$$I_1 = 4.10^2 \text{ watt/m}^2$$

$$T_2 = 327^\circ \text{ C} + 273 = 600 \text{ K}$$

- daya radiasi memenuhi :  

$$P = I \cdot A = e \sigma T^4 \cdot A$$

$$= 4 \cdot 10^2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 0,2 \text{ watt}$$
- energi radiasi selama  $t = 5 \text{ s}$  adalah :  

$$W = P \cdot t$$

$$= 0,2 \cdot 5 = 1,0 \text{ joule}$$
- Intensitas radiasi sebanding dengan suhu mutlak pangkat empat maka dapat diperoleh :  

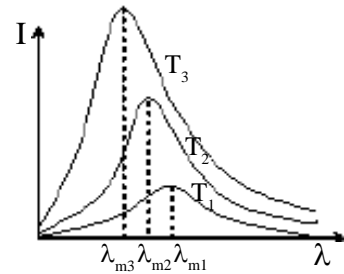
$$I \sim T^4$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^4 \rightarrow I_2 = \left( \frac{600}{300} \right)^4 4 \cdot 10^2 = 6,4 \cdot 10^2 \text{ watt/m}^2$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Sebuah benda hitam sempurna mempunyai luas permukaan  $2000 \text{ cm}^2$  dan suhu  $127^\circ \text{ C}$ . Tentukan :

- intensitas radiasinya,
- daya radiasinya,
- energi yang diradiasikan dalam sepuluh detik,
- daya radiasi benda jika suhunya diturunkan menjadi  $-73^\circ \text{ C}$  !



**Gambar 7.1**

## 2. Pergeseran Wien

Pada pengukuran intensitas radiasi benda hitam ( $I$ ) pada berbagai nilai panjang gelombang ( $\lambda$ ) dapat digambarkan grafik seperti pada *Gambar 7.1*. Perubahan intensitas diukur pada benda hitam yang memiliki suhu tetap  $T$ , tetapi  $\lambda$  berbeda-beda. Intensitas tersebut terlihat meningkat seiring dengan peningkatan  $\lambda$  hingga mencapai nilai maksimum. Kemudian intensitas menurun kembali seiring penambahan  $\lambda$ . Panjang gelombang energi radiasi pada saat intensitasnya maksimum dinamakan  $\lambda_m$ : *panjang gelombang maksimum*.

Pada pengukuran itu *Wilhelm Wien* menemukan adanya pergeseran panjang gelombang maksimum saat suhu benda hitam berubah. Kenaikan suhu benda hitam menyebabkan panjang gelombang maksimum yang dipancarkan benda akan mengecil. Hubungan ini dapat dituliskan seperti persamaan berikut.

$$\lambda_m T = c \quad \dots\dots\dots(7.2)$$

dengan :  $\lambda_m$  = panjang gelombang intensitas radiasi maksimum (m)

$T$  = suhu mutlak benda (K)

$c$  = tetapan Wien ( $2,90 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$ )



**CONTOH 7.2**

Sebuah benda hitam meradiasikan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang 8700 Å pada saat intensitas radiasinya maksimum. Berapakah suhu permukaan benda yang memancarkan gelombang tersebut?

**Penyelesaian**

$$\lambda_m = 8700 \text{ Å} = 8,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$c = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$$

Suhu benda dapat ditentukan sebagai berikut.

$$\lambda_m T = c$$

$$T = \frac{c}{\lambda_m} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{8,7 \cdot 10^{-7}} = 3000 \text{ K atau } 2727^\circ \text{ C}$$

**LATIHAN 7.1**

- Lampu pijar berbentuknya mendekati bola. Jari-jari lampu pijar pertama adalah empat kali jari – jari lampu kedua. Suhu lampu pijar pertama dan kedua masing-masing  $27^\circ \text{C}$  dan  $127^\circ \text{C}$ . Berapakah perbandingan daya lampu pertama dengan daya lampu kedua ?
- Sebuah benda hitam yang bersuhu  $27^\circ \text{C}$  dapat memancarkan radiasi dengan intensitas sebesar  $90 \text{ watt/m}^2$ . Luas penampangnya  $50 \text{ cm}^2$ . Berapakah :
  - daya radiasi,
  - intensitas radiasinya jika suhunya dinaikkan hingga menjadi  $327^\circ \text{C}$  ?
- Diketahui tetapan Wien =  $2,9 \times 10^{-3} \text{ mK}$ . Berapakah panjang gelombang elektromagnetik yang membawa radiasi kalor maksimum dari sebuah benda yang bersuhu  $127^\circ \text{C}$  ?

**B. Teori Kuantum Planck**

Perkembangan teori tentang radiasi mengalami perubahan besar pada saat Planck menyampaikan teorinya tentang radiasi benda hitam. Planck mulai bekerja pada tahun 1900. Planck mulai mempelajari sifat dasar dari getaran molekul-molekul pada dinding rongga benda hitam. Dari hasil pengamatannya Planck membuat simpulan sebagai berikut.

Setiap benda yang mengalami radiasi akan memancarkan energinya secara diskontinu (diskrit) berupa paket-paket energi. Paket-paket energi ini dinamakan kuantum (sekarang dikenal sebagai foton). Energi setiap foton sebanding dengan frekuensi gelombang radiasi dan dapat dituliskan :

$$E = hf \quad \dots\dots\dots(7.3)$$

dengan :  $E$  = energi foton (joule)

$f$  = frekuensi foton (Hz)

$h$  = tetapan Planck ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ )

Jika suatu gelombang elektromagnetik seperti cahaya memiliki banyak foton maka energinya memenuhi hubungan berikut.

$$E = nhf \quad \dots\dots\dots(7.4)$$

Persamaan yang sangat berkaitan dengan hubungan di atas adalah kecepatan cahaya :  $c = \lambda \cdot f$ . Besarnya  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s.

Pandangan Planck inilah yang dapat merombak pandangan fisika klasik dan mulai saat itu diakui sebagai batas munculnya teori modern dan dikenal dengan *teori kuantum Planck*.

### CONTOH 7.3

Sinar jingga dengan panjang gelombang 6600 Å dipancarkan dari suatu benda hitam yang mengalami radiasi. Tentukan energi foton yang terkandung pada sinar jingga tersebut?

#### Penyelesaian

$$\lambda = 6600 \text{ Å} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Kuantum energi sinar jingga memenuhi :

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} = 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{6,6 \cdot 10^{-7}} = 3 \cdot 10^{-19} \text{ joule}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Cahaya yang dipancarkan melalui radiasi benda hitam memiliki panjang gelombang 330 nm. Tentukan :

- energi foton dari cahaya tersebut,
- jumlah foton jika energinya sebesar  $12 \cdot 10^{-6}$  joule.

### Kekekalan Energi

Sesuai dengan energi lain, energi foton juga memenuhi kekekalan secara umum. Energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan tetapi dapat berubah ke bentuk lain. Kekekalan energi ini menjelaskan bahwa energi cahaya dapat berubah ke bentuk lain atau cahaya dapat dibentuk dari energi lain. Contoh perubahan energi cahaya adalah pada solar sel yaitu dapat diubah menjadi energi listrik. Apakah kalian memiliki kalkulator dengan sumber energi cahaya ? Contoh lain adalah energi listrik yang dapat berubah menjadi energi gelombang elektromagnetik yaitu produksi sinar-X. Elektron bergerak cepat dapat menumbuk logam pada anoda dan dapat meradiasikan energi. Energi ini yang dikenal sebagai sinar-X.

Sinar-X ini pertama kali ditemukan oleh *Wilhelm Roentgen* tahun 1895 sehingga dinamakan juga *sinar-Roentgen*. Hubungan energi foton dan energi listrik elektron ini memenuhi hubungan berikut.

$$eV = h \frac{c}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{hc}{eV} \dots\dots\dots(7.5)$$

dengan :  $\lambda$  = panjang gelombang foton (sinar-X)  
 $h$  = tetapan Planck ( $6,6 \cdot 10^{-34}$  Js)  
 $c$  = cepat rambat gelombang elektromagnetik ( $3 \cdot 10^8$  m/s)  
 $e$  = muatan elektron ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C)  
 $V$  = beda potensial pemercepat elektron (volt)

### CONTOH 7.4

Elektron di dalam tabung sinar-X diberi beda potensial 2000 volt. Pada proses tumbukan, sebuah elektron dapat menghasilkan satu foton. Tentukan panjang gelombang minimum yang dihasilkan oleh tabung sinar-X?

#### Penyelesaian

$V = 2000$  volt = 2000 volt

Panjang gelombang terpendek sinar X yang dihasilkan sebesar :

$$\lambda = \frac{hc}{eV} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^4} = 1,24 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Pada produksi sinar-X, tabung sinar-X diberi beda potensial 4000 volt. Jika sebuah elektron dapat menghasilkan satu foton maka tentukan :

- panjang gelombang minimum,
- frekuensi maksimum yang dihasilkan oleh tabung sinar-X !



### LATIHAN 7.2

- Jika konstanta Planck  $6,6 \times 10^{-34}$  Js dan cepat rambat cahaya  $c = 3 \times 10^8$  m/s, maka sinar Na yang panjang gelombangnya 590 nm. Berapakah energi fotonnya !
- Seberkas sinar X dengan kecepatan  $3 \times 10^8$  m s<sup>-1</sup> memiliki momentum foton sebesar  $6,6 \times 10^{-23}$  Ns. Bila konstanta Planck  $6,6 \times 10^{-34}$  J.s, maka tentukan frekuensi sinar X !
- Andaikan 5,5% energi lampu pijar dipancarkan sebagai sinar terlihat yang panjang gelombangnya sama dengan 5400 Å. Jika konstanta Planck  $h = 6,6 \times 10^{-34}$  Js, hitunglah jumlah foton yang dipancarkan lampu pijar 100 W perdetik!

4. Dalam tabung sinar X, berkas elektron dipercepat oleh beda potensial  $5 \times 10^4$  V, dihentikan seketika oleh anoda, sehingga semua energi elektron menjadi gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang dalam daerah sinar X. Jika konstanta Planck  $6,62 \times 10^{-34}$  Js,  $c = 3 \times 10^8$  m/s dan muatan elektron  $1,6 \times 10^{-19}$  C, maka berapakah panjang gelombang sinar yang terjadi ?
5. Berapakah panjang gelombang terpendek dan frekuensi terbesar sinar-X yang dihasilkan tabung sinar-X melalui beda potensial tegangan 50 kV antara target dan katode ?

## Rangkuman Bab 7

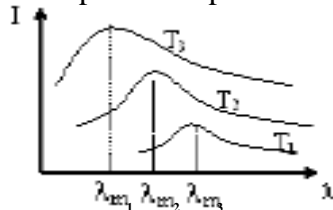
1. Setiap benda yang mengalami suhu bukan OK akan mengalami radiasi dan memenuhi persamaan berikut.  
 Intensitas :  $I = e \sigma T^4$   
 Daya :  $P = I \cdot A$   
 Energi :  $E = P \cdot t$
2. Pada radiasi benda terjadi pergeseran panjang gelombang maksimum saat suhunya naik. Dan berlaku pergeseran Win dengan persamaan :  $\lambda_m T = 2,9 \cdot 10^{-3}$
3. Menurut Planch, cahaya atau gelombang elektromagnetik mengandung paket-paket energi yang disebut foton. Energinya sebesar:  $E = h f$   
 Contoh bukti energi ini adalah produksi sinar X. Panjang gelombang yang dihasilkan memenuhi :  $\lambda = \frac{eV}{hc}$

## Evaluasi Bab 7

Pilihlah jawaban yang benar pada soal-soal berikut dan kerjakan di buku tugas kalian.

1. Kemampuan sebuah benda untuk melepas radiasi sangat berdekatan dengan kemampuannya untuk menyerap radiasi. Pernyataan tersebut menggambarkan gejala fisis yang cocok dengan salah satu peristiwa berikut yaitu ....  
 A. Efek foto listrik  
 B. Efek Compton  
 C. Produksi pasangan  
 D. Produksi sinar-X  
 E. Radiasi benda hitam
2. Jumlah kalor yang dipancarkan oleh sebuah benda suhunya lebih besar dari 0 K, berbanding lurus dengan ....  
 A. suhunya  
 B. pangkat dua dari suhunya  
 C. suhu sekelilingnya  
 D. massa benda itu  
 E. luas permukaan benda
3. Energi yang diradiasikan perdetik oleh benda hitam pada suhu  $T_1$  besarnya 16 kali energi yang diradiasikan perdetik pada suhu  $T_0$ ; maka  $T_1 = \dots$   
 A.  $2 T_0$   
 B.  $2,5 T_0$   
 C.  $3 T_0$   
 D.  $4 T_0$   
 E.  $5 T_0$
4. Sebuah benda hitam sempurna mempunyai luas permukaan  $1000 \text{ cm}^2$  dengan suhu  $727^\circ\text{C}$ . Jika konstanta Stefan– Boltzmann  $s = 5,5 \cdot 10^{-8} \text{ watt/m}^2 \cdot \text{K}^4$ , maka besarnya energi yang dipancarkan selama 1 menit ialah ....  
 A.  $3,4 \times 10^3 \text{ J}$   
 B.  $5,6 \times 10^3 \text{ J}$   
 C.  $1,0 \times 10^3 \text{ J}$   
 D.  $3,4 \times 10^5 \text{ J}$   
 E.  $5,6 \times 10^5 \text{ J}$

5. Grafik di bawah adalah grafik antara intensitas radiasi benda hitam dengan suhu mutlak. Berdasarkan grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa ....



- A.  $T_1 < T_2 < T_3$  dan  $\lambda_{m3} < \lambda_{m2} < \lambda_{m1}$   
 B.  $T_1 < T_2 < T_3$  dan  $\lambda_{m3} > \lambda_{m2} > \lambda_{m1}$   
 C.  $T_1 > T_2 > T_3$  dan  $\lambda_{m3} < \lambda_{m2} < \lambda_{m1}$   
 D.  $T_1 > T_2 > T_3$  dan  $\lambda_{m3} > \lambda_{m2} > \lambda_{m1}$   
 E.  $T_1 < T_2 < T_3$  dan  $\lambda_{m3} = \lambda_{m2} = \lambda_{m1}$
6. Sebuah benda hitam mempunyai suhu 2000 K. Jika konstanta hukum pergeseran Wien  $C = 2,898 \cdot 10^{-3}$  mK, maka rapat energi maksimum yang dipancarkan benda itu terletak pada panjang gelombang  $\lambda$  maks sebesar ....  
 A. 1,4 mm                      D. 7,3 mm  
 B. 2,9 mm                      E. 12,4 mm  
 C. 5,8 mm
7. Sebuah benda meradiasikan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang 5800 Å. Jika konstanta Wien  $= 2,9 \times 10^{-3}$  mK, maka suhu permukaan benda yang memancarkan gelombang tersebut adalah ....  
 A.  $1.450^\circ\text{C}$                       D.  $4.727^\circ\text{C}$   
 B.  $2.900^\circ\text{C}$                       E.  $5.000^\circ\text{C}$   
 C.  $4.350^\circ\text{C}$
8. Jika konstanta Planck  $6,6 \times 10^{-34}$  Js, cepat rambat cahaya  $c = 3 \times 10^8$  m/s dan panjang gelombang cahaya 600 nm, maka energi foton cahaya itu = ....  
 A.  $0,3 \times 10^{-19}$  J                      D.  $3 \times 10^{-19}$  J  
 B.  $0,33 \times 10^{-19}$  J                      E.  $33 \times 10^{-19}$  J  
 C.  $3,3 \times 10^{-19}$  J
9. Menurut teori kuantum berkas cahaya terdiri dari foton, intensitas berkas cahaya ini :  
 A. berbanding lurus dengan energi foton  
 B. berbanding lurus dengan akar energi foton  
 C. berbanding lurus dengan banyaknya foton  
 D. berbanding lurus dengan kuadrat banyaknya foton  
 E. tidak tergantung pada energi foton
10. Yang fotonya mempunyai energi terbesar dari yang berikut adalah ....  
 A. sinar merah                      D. sinar-X  
 B. sinar ungu                      E. sinar-g  
 C. gelombang radio
11. Jika sebuah pemancar radio berdaya 1000 watt memancarkan foton tiap detiknya sebanyak  $5 \times 10^{20}$  buah, maka energi satu fotonya ....  
 A.  $2 \times 10^{-17}$  joule  
 B.  $5 \times 10^{-17}$  joule  
 C.  $2 \times 10^{-18}$  joule  
 D.  $5 \times 10^{-20}$  joule  
 E.  $2 \times 10^{-20}$  joule
12. Elektron di dalam tabung sinar-X. Jika sebuah elektron menghasilkan satu foton pada saat elektron tersebut menumbuk target, panjang gelombang minimum yang dihasilkan oleh tabung tersebut dalam nm adalah ....  
 A. 0,0124                              D. 12,4  
 B. 0,124                              E. 124  
 C. 1,24
13. Sinar X diradiasikan dari potensial pemercepat 50.000 V, frekuensi terbesar yang terjadi adalah ....  
 A.  $1,2 \times 10^{19}$  Hz                      D.  $4 \times 10^{20}$  Hz  
 B.  $1,2 \times 10^{17}$  Hz                      E.  $4 \times 10^{20}$  Hz  
 C.  $1,2 \times 10^{21}$  Hz
14. Radiasi yang ditimbulkan karena elektron yang bergerak cepat tiba-tiba dihentikan adalah ....  
 A. Efek foto listrik  
 B. Efek campuran  
 C. Produksi pasangan  
 D. Produksi sinar - X  
 E. Radiasi benda hitam
15. Andaikan 11% energi lampu pijar dipancarkan sebagai sinar terlihat yang panjang gelombangnya sama dengan 2700 Å. Jika konstanta Planck  $h = 6,6 \times 10^{-34}$  Js, jumlah foton yang dipancarkan lampu pijar 100 W perdetik = ....  
 A.  $1,1 \times 10^{19}$                               D.  $2,0 \times 10^{19}$   
 B.  $1,5 \times 10^{19}$                               E.  $2,2 \times 10^{19}$   
 C.  $1,8 \times 10^{19}$

# B A B

## 8

# FISIKA ATOM



*Sumber: portal.mpklang.gov.my*

Coba kalian amati gambar di atas. Bagaimana lampu-lampu itu bisa menyala. Tabung lampu itu dirancang dari tabung lucutan sinar katoda. Apakah sinar katoda itu? Apakah atom itu?

Pertanyaan-pertanyaan di atas dapat kalian pelajari pada bab ini. Oleh sebab itu setelah belajar bab ini diharapkan kalian dapat:

1. menjelaskan sejarah perkembangan model atom,
2. menentukan jari-jari dan energi elektron pada tingkat energi tertentu berdasarkan teori Wils Bohr,
3. menjelaskan spektrum atom hidrogen,
4. menjelaskan sifat-sifat pada atom berelektron banyak.

## A. Perkembangan Teori Atom

Teori tentang atom telah muncul sebelum Masehi. Contohnya adalah definisi atom menurut Demokritus. Demokritus membuat simpulan : *Suatu zat dapat dibagi menjadi yang lebih kecil hingga mendapatkan bagian yang paling kecil dan tidak dapat dibagi lagi dan dinamakan atom.* Kata atom ini berasal dari bahasa Yunani “*atomos*” yang berarti tak dapat dipotong. Kemudian muncul lagi setelah Masehi seperti yang disampaikan oleh *John Dalton* (1766–1844). Menurut Dalton *atom* adalah bagian suatu unsur yang tak dapat dibagi lagi.

Perkembangan berikutnya dapat diperhatikan seperti berikut.

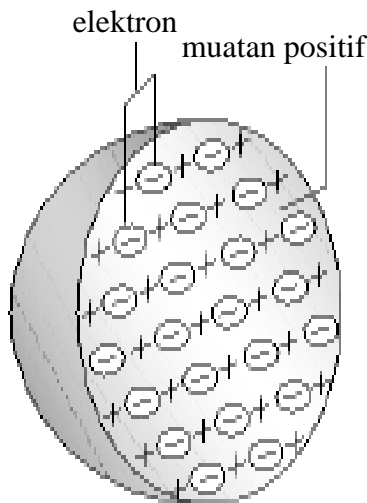
### 1. Model Atom Thomson

Model atom J.J. Thomson ini bermula dari penemuan tabung lucutan sinar katoda. Dengan tabung lucutan itulah Thomson menemukan bahwa sinar katoda itu merupakan suatu partikel dan bermuatan negatif yang kemudian dinamakan elektron. Dari percobaan itu pula Thomson dapat menemukan nilai  $e/m$ . Nilainya  $e/m = 1,758803 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$ . Tetapi Thomson memperoleh kira-kira  $1,0 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$ .

Penemuan  $e/m$  membuktikan bahwa atom bukan lagi bagian terkecil dari suatu zat. Menurut Thomson, atom memiliki bagian yang bermuatan negatif yaitu elektron. Bagian atom selain elektron bermuatan positif sehingga secara keseluruhan adalah netral. Kemudian Thomson mengusulkan teori tentang atom seperti berikut.

*Atom berbentuk bola padat dengan elektron bermuatan negatif menyebar di seluruh bagian bola dan bagian bola lain bermuatan positif.*

Gambaran atom Thomson dapat dilihat seperti pada *Gambar 8.1*. Bentuknya seperti roti kismis sehingga teori atom Thomson dikenal sebagai *model atom roti kismis*.



**Gambar 8.1**  
Model atom roti kismis.

### Percobaan tetes Minyak Millikan

Setelah penemuan  $e/m$ , dapat ditemukan muatan sebuah elektron oleh *Robert A Millikan* (1885 - 1953) pada tahun 1909. Millikan melakukan percobaan dengan menggunakan tetes minyak sehingga dinamakan *percobaan tetes minyak Millikan*.

Dalam percobaannya Millikan menemukan bahwa muatan tetes minyak yang diukur selalu kelipatan dari nilai tertentu. Nilai itulah yang sama dengan muatan elektron. Sekarang telah diketahui lebih teliti sebesar,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

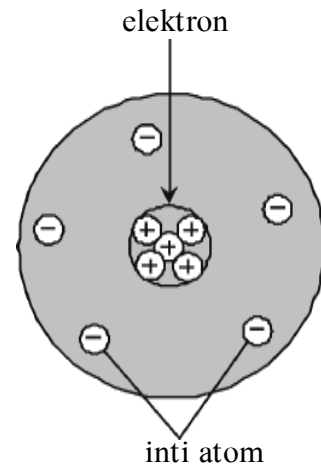
Kemudian secara otomatis akan dapat dihitung massa elektron, yaitu  $9,11 \cdot 10^{-31}$  kg.

## 2. Model Atom Rutherford

Rutherford mulai mengusulkan teori tentang atom setelah melakukan percobaan hamburan partikel alfa oleh lempengan emas tipis. Lempengan emas tipis ditembak dengan partikel alfa. Ternyata Rutherford memperoleh fakta bahwa tidak semua partikel alfa dipantulkan. Hal ini membuktikan bahwa atom bukanlah benda padat melainkan memiliki rongga-rongga. Kemudian Rutherford mengusulkan suatu model atom sebagai berikut.

*Atom memiliki muatan positif dan sebagian besar massa yang terkumpul dalam satu titik yang dinamakan inti atom. Sedangkan elektron mengelilingi inti pada jarak yang cukup jauh seperti planet-planet pada tata surya.*

Berdasarkan teori atom di atas, atom dapat digambarkan seperti pada Gambar 8.2.



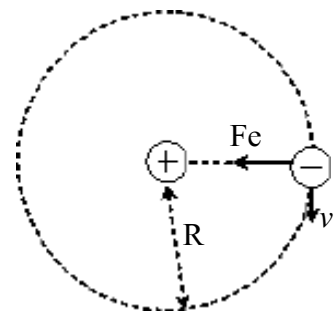
**Gambar 8.2**  
Model atom Rutherford

## 3. Model Atom Niels Bohr

### a. Asumsi Dasar Bohr

Niels Bohr (1885 - 1962) adalah asisten dari Thomson dan juga asisten dari Rutherford. Dia merasa belum puas dengan teori-teori atom yang ada setelah ditemukannya spektrum atom hidrogen dengan perumusan Balmer. Kemudian Niels Bohr merumuskan empat asumsi dasar untuk menopang teori atomnya dengan menghubungkan fisika klasik dengan teori kuantum Planck-Einstein sebagai berikut.

- (1) Elektron bergerak mengelilingi inti (proton) dalam pengaruh gaya elektrostatis.
- (2) Elektron hanya bisa berputar mengelilingi inti pada orbit tertentu yang memenuhi energi tertentu dalam keadaan stabil sehingga dinamakan *orbit stasioner*. Karena harus memenuhi energi tertentu maka lintasan elektron ini juga dinamakan *tingkat energi*.
- (3) Elektron akan memancarkan radiasi jika berpindah dari tingkat energi yang lebih tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah dan sebaliknya. Energi radiasinya sama dengan perubahan tingkat energinya dan memenuhi rumus Planck-Einstein.



**Gambar 8.3**  
Elektron mengelilingi inti dibawah pengaruh gaya elektrostatis

$$\Delta E = E_{\text{akhir}} - E_{\text{awal}} = hf \quad \dots\dots\dots (8.1)$$



- (4) Orbit-orbit yang diperkenankan untuk ditempati elektron adalah orbit-orbit yang memenuhi momentum sudut kelipatan dari  $\frac{h}{2\pi}$ .

$$L = m v r = n \frac{h}{2\pi} \quad \dots\dots\dots (8.2)$$

$n$  dinamakan tingkat energi dan nilainya adalah 1, 2, 3, 4, ....

### b. Jari-jari dan Tingkat energi

Dari asumsi dasar itulah kemudian Bohr dapat menurunkan jari-jari lintasan elektron dan memenuhi persamaan berikut.

$$r_n = n^2 r_0 \quad \dots\dots\dots (8.3)$$

dengan :  $r$  = jari-jari elektron pada tingkat  $n$

$r_0$  = jari-jarinya adalah  $0,528 \text{ }^\circ\text{A}$

$n$  = tingkat energi

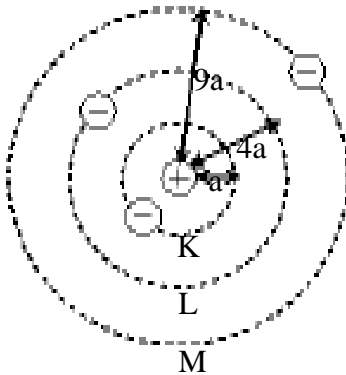
Dan besarnya energi yang dimiliki elektron pada tingkat energi tertentu memenuhi persamaan berikut.

$$E_n = - \frac{13,6}{n^2} \text{ eV} \quad \dots\dots\dots (8.4)$$

dengan :  $E_n$  = energi elektron pada tingkat  $n$

$n$  = tingkat energi ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )

Tingkat-tingkat energi elektron ini juga memiliki nama lain dan dinamakan kulit.  $n = 1$  adalah kulit K,  $n = 2$  adalah kulit L,  $n = 3$  adalah kulit M dan seterusnya kulit N, O dan P.



**Gambar 8.4**  
Tingkat energi elektron.

### CONTOH 8.1

Energi elektron atom hidrogen pada tingkat dasar adalah  $-3,6 \text{ eV}$  dan jari-jarinya adalah  $0,528 \text{ }^\circ\text{A}$ . Tentukan :

- jari-jari dan energi elektron pada lintasan M,
- energi yang dilepaskan jika elektron berpindah dari kulit M ke kulit K!

Penyelesaian

$$E_0 = - 13,6 \text{ eV}$$

$$r_0 = 0,528 \text{ }^\circ\text{A} = 5,28 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

kulit M berarti  $n = 3$

- Jari-jari pada kulit M sebesar :

$$r_3 = n^2 \cdot r_0$$

$$r_3 = 3^2 \cdot 5,28 \cdot 10^{-11} = 4,752 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Dan energi elektron pada tingkat energi pada kulit M sebesar :

$$E_n = - \frac{13,6}{n^2}$$

$$E_3 = - \frac{13,6}{3^2} = - 1,51 \text{ eV}$$

- b. Perpindahan elektron ini akan melepaskan energi sebesar :

$$\begin{aligned} \Delta E &= E_3 - E_1 \\ &= - 1,51 - (-13,6) = 12,09 \text{ eV} \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Energi elektron atom hidrogen pada tingkat dasar adalah -3,6 eV dan jari-jarinya adalah 0,528 Å. Tentukan :

- jari-jari dan energi elektron pada lintasan L,
- energi yang diserap jika elektron berpindah dari kulit K ke kulit L!

### c. Spektrum Atom Hidrogen

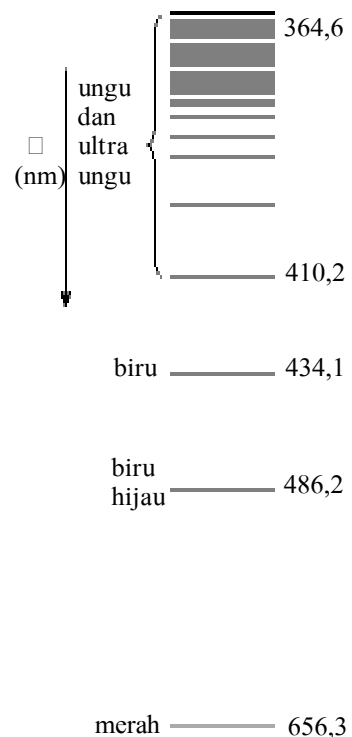
Pada atom hidrogen elektron akan mengelilingi inti pada lintasan tertentu. Jika ada elektron dari luar atau tingkat yang lebih tinggi berpindah menuju ke tingkat energi lebih rendah maka elektron itu dapat memancarkan energi yang berupa gelombang elektromagnetik. Pemancaran ini pertama kali ditemukan oleh *J.J Balmer* seorang guru matematika di Swiss pada tahun 1884. Balmer menemukan pancaran cahaya tampak dari atom hidrogen.

Dalam perkembangannya ditemukan berbagai pemancaran gelombang elektromagnetik sesuai dengan perpindahan elektronnya. Pemancaran berbagai gelombang inilah yang dinamakan dengan spektrum atom hidrogen. Spektrum hidrogen ini bersifat diskrit dan dapat dijelaskan dengan baik oleh teori Bohr.

Panjang gelombang yang dipancarkan pada spektrum atom hidrogen ini memenuhi persamaan berikut.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_A^2} - \frac{1}{n_B^2} \right) \dots\dots\dots (8.5)$$

dengan :  $\lambda$  = panjang gelombang (m)



**Gambar 8.5**

Spektrum atom hidrogen deret Balmer.

$n_A$  = kulit yang dituju elektron

$n_B$  = kulit asal elektron

$R$  = konstanta Rydberg ( $1,097.107 \text{ m}^{-1}$ )

Pada spektrum atom hidrogen ini dikenal ada 5 deret yaitu :

1. Deret Lyman : Ultra Violet,  $n_A = 1$  dan  $n_B = 2, 3, 4, \dots$
2. Deret Balmer : cahaya tampak,  $n_A = 2$  dan  $n_B = 3, 4, 5, \dots$
3. Deret Paschen : Infra Merah 1,  $n_A = 3$  dan  $n_B = 4, 5, 6, \dots$
4. Deret Brachet : Infra Merah 2,  $n_A = 4$  dan  $n_B = 5, 6, 7, \dots$
5. Deret Pfund : Infra Merah 3,  $n_A = 5$  dan  $n_B = 6, 7, 8, \dots$

### CONTOH 8.2

Panjang gelombang ultraviolet yang dipancarkan atom hidrogen pada deret Lyman dapat ditentukan dari persamaan 8:5 dengan  $n_A = 1$  dan  $n_B$  lebih dari 1. Tentukan panjang gelombang tersebut untuk :

- a.  $n_B = 2$
- b.  $n_B = \sim$
- c. pada nilai  $n_B$  berapakah diperoleh panjang gelombang terbesar dan terpendek?

### Penyelesaian

Deret Lyman akan selalu memenuhi panjang gelombang pada nilai berikut.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{1} - \frac{1}{n_B^2} \right)$$

maka nilai  $\lambda$  dapat dihitung sebagai berikut :

- a. Untuk  $n_B = 3$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda_1} &= R \left( \frac{1}{1} - \frac{1}{3^2} \right) \\ &= R \left( \frac{1}{1} - \frac{1}{9} \right) = \frac{8R}{9} \\ \lambda_1 &= \frac{96}{8R} \end{aligned}$$

$$= \frac{9}{8.1,09678 \times 10^7} = 1,023.10^{-7} \text{ m} = 1023 \text{ \AA}$$

b. Untuk  $n_B = \infty$

$$\frac{1}{\lambda_2} = R \left( \frac{1}{1} - \frac{1}{\infty^2} \right) = R$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{R}$$

$$= \frac{1}{1,09678 \times 10^7} = 0,9112 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 911,2 \text{ \AA}$$

c. Dari nilai di atas berarti panjang gelombang terbesar adalah  $\lambda_1$  untuk  $n_B = 1$  dan panjang gelombang terpendek adalah  $\lambda_2$  untuk  $n_B = \infty$ .

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Panjang gelombang cahaya yang dipancarkan atom hidrogen pada deret Balmer dapat ditentukan dari persamaan 8:5 dengan  $n_A = 2$  dan  $n_B$  lebih dari 2. Tentukan panjang gelombang dan frekuensi tersebut untuk :

- $n_B = 3$
- $n_B = \infty$
- pada nilai  $n_B$  berapakah diperoleh panjang gelombang terbesar dan terpendek?



## LATIHAN 8.1

- Energi elektron atom hidrogen pada tingkat dasar adalah  $-13,6 \text{ eV}$ . Tentukan energi elektron dan jari-jari lintasan kulit L, M dan N !
- Pernyataan di bawah ini berhubungan dengan pemancaran dan penyerapan energi oleh setiap atom. Tentukan benar atau salahkan pernyataan berikut !
  - Setiap elektron yang bergerak pada lintasannya selalu memancarkan energi
  - Pada pemancaran dan penyerapan energi, elektron loncat ke lintasan yang lebih luar
  - Pada pemancaran dan penyerapan energi, elektron loncat ke lintasan yang lebih dalam
  - Pada pemancaran energi, elektron loncat ke lintasan luar, sedangkan pada penyerapan energi elektron loncat ke lintasan yang lebih dalam.
- Pada pemancaran energi, elektron loncat ke lintasan dalam, sedangkan pada penyerapan energi, elektron loncat ke lintasan yang lebih luar.
- Energi elektron pada keadaan dasar di dalam atom hidrogen  $-13,6 \text{ eV}$ . Berapakah energi yang dibutuhkan untuk memindahkan elektron dari keadaan dasar ke kulit atom dengan bilangan kuantum 2 !
- Bila elektron atom hidrogen berpindah dari lintasan  $n = 3$  ke lintasan  $n = 2$ , maka akan dipancarkan foton. Jika konstanta Rydberg  $= 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$  maka berapakah panjang gelombang foton yang dipancarkannya ?
- Tentukan panjang gelombang terbesar yang dihasilkan pada deret :
  - Lyman,
  - Balmer,
  - Pachen,
  - Brakhet,
  - Pfund

## B. Atom Berelektron banyak

Teori atom Bohr ternyata hanya dapat menjelaskan dengan baik atom hidrogen yang hanya memiliki satu elektron stabil. Bagaimanakah dengan atom-atom berelektron banyak? Penjelasannya dapat kalian pelajari seperti berikut.

### 1. Bilangan Kuantum

Jawaban yang sekarang dapat menjawab tentang atom berelektron banyak adalah mekanika kuantum. Mekanika kuantum memberikan 4 bilangan kuantum untuk menjelaskan keadaan elektron pada atom. Keempat bilangan kuantum itu dapat dijelaskan seperti di bawah.

#### a. Bilangan kuantum utama

Bilangan kuantum utama menyatakan tingkat energi elektron dan disimbolkan  $n$ . Nilainya adalah 1, 2, 3, ... . Untuk ion-ion yang juga memiliki satu elektron seperti hidrogen (misalkan  $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{2+}$ ) akan memenuhi nilai energi elektron yang sesuai dengan teori Bohr dan juga dipengaruhi oleh kuadrat nomor atomnya ( $Z^2$ ). Persamaannya menjadi seperti berikut.

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \cdot Z^2 \text{ eV} \quad \dots\dots\dots (8.6)$$

### CONTOH 8.3

Tentukan energi total elektron ion  $\text{Li}^{2+}$  ( $Z = 3$ ) pada keadaan bilangan kuantum utama  $n = 2$  !

#### Penyelesaian

Energi total elektron ion  $\text{Li}^{2+}$  pada tingkatan energi  $n = 2$  memenuhi:

$$\begin{aligned} E_n &= -\frac{13,6}{n^2} \cdot Z^2 \\ &= -\frac{13,6}{2^2} \cdot 9 = -30,6 \text{ eV} \end{aligned}$$

*Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.*

Tentukan energi total elektron ion  $\text{He}^+$  ( $Z = 2$ ) pada keadaan bilangan kuantum utama  $n = 2$  !

### b. Bilangan Kuantum Orbital

Bilangan kuantum orbital menyatakan kuantisasi momentum sudut elektron dan disimbolkan  $l$ . Bilangan kuantum yang disebut juga bilangan kuantum azimut ini dapat menjawab gejala atomik yang dikenal dengan *efek Zeeman* yaitu efek garis-garis tambahan dalam spektrum emisi saat atom-atom tereksitasi diletakkan di daerah bermedan magnetik homogen.

Nilai bilangan kuantum ini memenuhi  $\ell = 0, 1, 2, 3, \dots (n-1)$  dan disebut sub kulit = s, p, d, f, . . . .

### c. Bilangan Kuantum magnetik

Bilangan kuantum magnetik dapat digunakan untuk menentukan kemiringan vektor momentum sudut elektron. Nilainya disimbolkan  $m_\ell$  yang dibatasi dari nilai  $l$ -nya yaitu memenuhi  $m_\ell = -\ell, \dots, 0, \dots, +\ell$ .

### d. Bilangan Kuantum Spin

Bilangan kuantum spin menyatakan momentum sudut  $\frac{1}{2}$  dari elektron. Arahnya ada dua dan diberikan nilai  $s = +\frac{1}{2}$  dan  $s = -\frac{1}{2}$ .

## 2. Energi Ionisasi dan Afinitas elektron

### a. Energi ionisasi

Pada kulit pertama  $E_1 = -13,6$  eV. Mengapa bernilai negatif? Ternyata nilai itu memiliki arti bahwa untuk melepaskan elektron dari kulit pertama ke kulit tak terhingga diperlukan energi sebesar 13,6 eV. *Energi yang diperlukan untuk melepaskan sebuah elektron yang tidak terikat erat dalam atomnya dan dalam keadaan gas disebut energi ionisasi.*

### b. Afinitas elektron

Selain elektron dapat lepas dari atom, ternyata juga dapat terjadi sebaliknya. Energi yang dibebaskan oleh atom saat menangkap sebuah elektron disebut **afinitas elektron**. Semakin besar afinitas elektron sebuah atom maka semakin mudah atom itu menangkap elektron, berarti nula semakin mudah membentuk ion negatif.



## LATIHAN 8.2

1. Ion  $\text{Li}^{2+}$  memiliki elektron pada tingkat  $n = 3$ . Tentukan energi yang dimiliki elektron itu. Tentukan pula energi yang dipancarkan jika elektron tersebut pindah ke  $n = 2$ !
2. Apakah yang dapat kalian jelaskan tentang bidang kuantum elektron? Adakah elektron yang memiliki bilangan kuantum sama?
3. NaCl tersusun dari  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$ . Bagaimana sifat ionisasi dan afinitas elektron dari kedua atom itu? Jelaskan perbedaannya.

## Rangkuman Bab 8

1. Pencetusan model atom dimulai dari Demokretus (sebelum masehi), dan kemudian dilanjutkan oleh Jonh Dalton. Kedua ilmuwan ini masih sepakat bahwa atom merupakan bagian terkecil dari suatu unsur.
2. Perkembanganya dicetuskan oleh J.J. Thomson, dengan ditemukannya elektron (sinar katoda) yang memiliki  $e/m = 1,758803 \cdot 10^{11} \text{C/kg}$ . Menurut Thomson atom seperti roti kismis dengan elektron mengisi kesegala ruang.
3. Rutherford menjelaskan bahwa elektron mengelilingi inti seperti planet. Buktinya adalah hamburan partikel  $\alpha$  pada lempengan emas.
4. model atom Bohr dapat menjelaskan dengan baik tentang atom hidrogen.
  - a. Jari-jari hitungan :
 
$$r_n = n^2 \cdot 0,528 \text{ \AA}$$
  - b. Tingkat energi :
 
$$E_n = \frac{-13,6}{n^2}$$
  - c. Elektron akan memancarkan energi jika pindah ke tingkat energi rendah dan sebaliknya.
  - d. Spektrum atom hidrogen memiliki panjang gelombang:
 
$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_A^2} - \frac{1}{n_B^2} \right)$$
5. Bilangan kuantum ada empat.
  - a. Bilangan kuantum utama :  $n = 1, 2, 3, \dots$
  - b. Bilangan kuantum orbital :  $l = 0, 1, 2, 3, \dots, (n-1)$
  - c. Bilangan kuantum magnetik :  $m_l = -l, \dots, 0, \dots + l$
  - d. Bilangan kuantum Spin :  $s = +\frac{1}{2}, s = -\frac{1}{2}$ .

## Evaluasi Bab 8

*Pilihlah jawaban yang benar pada soal-soal berikut dan kerjakan di buku tugas kalian.*

- Percobaan hamburan Rutherford menghasilkan kesimpulan ....
  - atom adalah bagian terkecil dari unsur
  - elektron adalah bagian atom yang bermuatan listrik negatif
  - atom memiliki massa yang tersebar secara merata
  - elektron mengelilingi inti pada lintasan tertentu
  - massa atom terpusat pada tempat yang disebut inti
- Dua kelemahan terhadap teori atom Rutherford antara lain ....
  - Atom-atom tidak stabil dan spektrum atom bersifat kontinu
  - Atom-atom tidak stabil dan bersifat diskrit (Spektrum garis)
  - Atom-atom bersifat netral dan elektron mengelilingi inti atom
  - Atom-atom tidak netral dan elektron mengelilingi inti atom
  - Inti atom tidak mengalami perubahan dan struktur atom stabil
- Salah satu ketentuan Bohr dalam model atomnya adalah ....
  - elektron pada lintasan stasionernya memancarkan energi
  - elektron yang berpindah dari lintasan dengan energi tinggi ke lintasan dengan energi yang lebih rendah akan memancarkan foton
  - elektron pada lintasan stasionernya menyerap energi
  - elektron mengelilingi inti pada lintasan tertentu memiliki momentum linier
  - elektron pada lintasan dengan energi paling rendah tidak tereksitasi
- Jika jari-jari elektron tingkat energi terendah pada model atom Bohr adalah  $a$ , maka jari-jari elektron pada tingkat energi ke - 3 adalah ....
  - $2a$
  - $3a$
  - $4a$
  - $9a$
  - $16a$
- Energi elektron atom hidrogen pada tingkat dasar adalah  $-13,6 \text{ eV}$ . Energi elektron pada lintasan L adalah ....
  - $-54,4 \text{ eV}$
  - $-27,2 \text{ eV}$
  - $-13,6 \text{ eV}$
  - $-6,8 \text{ eV}$
  - $-3,4 \text{ eV}$
- Elektron atom hidrogen model Bohr mengelilingi intinya dengan bilangan kuantum  $n$ . Bila energi elektron pada kulit itu bernilai  $1/9$  kali energi elektron pada kulit pertama, maka nilai  $n$  itu adalah ....
  - 3
  - 4
  - 9
  - 16
  - 32
- Sebuah atom akan memancarkan foton, apabila salah satu elektronnya ....
  - meninggalkan atom
  - bertumbukan dengan elektron lainnya
  - bertukar tingkat energi dengan elektron yang lain
  - mengalami transisi ke tingkat energi yang lebih rendah
  - mengalami transisi ke tingkat energi yang lebih tinggi



8. Pada lintasan dasar, elektron atom hidrogen memiliki energi sebesar  $-13,6 \text{ eV}$ . Saat elektron atom hidrogen berpindah lintasan dari bilangan kuantum  $n = 1$  ke bilangan kuantum  $n = 2$ , maka yang terjadi pada atom tersebut adalah ....
- A. menyerap energi sebesar  $13,4 \text{ eV}$   
B. memancarkan energi sebesar  $10,2 \text{ eV}$   
C. menyerap energi sebesar  $10,2 \text{ eV}$   
D. memancarkan energi sebesar  $3,4 \text{ eV}$   
E. menyerap energi sebesar  $3,4 \text{ eV}$
9. Elektron pada atom yang berpindah lintasan luar ke yang lebih dalam akan memancarkan gelombang elektromagnetik. Manakah perpindahan di bawah yang menghasilkan frekuensi terbesar ?
- A. dari  $n = 7$  ke  $n = 3$   
B. dari  $n = 7$  ke  $n = 2$   
C. dari  $n = 6$  ke  $n = 2$   
D. dari  $n = 3$  ke  $n = 1$   
E. dari  $n = 2$  ke  $n = 1$
10. Elektron atom hidrogen berpindah dari lintasan  $n = 2$  ke  $n = 1$ . Apabila konstanta Rydberg  $= 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ , maka panjang gelombang foton yang diradiasikan oleh atom tersebut adalah ....
- A.  $1097 \text{ }^\circ\text{A}$                       D.  $6541 \text{ }^\circ\text{A}$   
B.  $1215 \text{ }^\circ\text{A}$                       E.  $8227 \text{ }^\circ\text{A}$   
C.  $2115 \text{ }^\circ\text{A}$
11. Jika konstanta Rydberg  $= 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$  dan  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ , maka frekuensi terbesar pada deret Paschen adalah ....
- A.  $18,75 \times 10^{15} \text{ Hz}$     B.  $7,68 \times 10^{15} \text{ Hz}$   
C.  $3,00 \times 10^{15} \text{ Hz}$     E.  $3,66 \times 10^{14} \text{ Hz}$   
D.  $3,66 \times 10^{15} \text{ Hz}$
12. Sebuah elektron pada ion yang berelektron tunggal memiliki energi sebesar  $-30,6 \text{ eV}$ . Jika bilangan kuantum utama elektron  $n = 2$ , maka ion tersebut memiliki nomor atom sebesar ....
- A. 1                                      D. 4  
B. 2                                      E. 5  
C. 3
13. Pada setiap atom terdapat beberapa jenis bilangan kuantum. Untuk bilangan kuantum utama  $n = 4$ , terdapat bilangan kuantum orbital sebanyak ....
- A. 4                                      D. 1  
B. 3                                      E. 0  
C. 2
14. Spektrum garis memberikan informasi tentang ....
- A. jumlah proton dalam inti  
B. jumlah elektron dalam inti  
C. energi dari tingkat energi elektron  
D. beda energi antara dua tingkat  
E. jari-jari lintasan elektron
15. Afinitas elektron adalah ....
- A. energi yang dibebaskan pada saat pembentukan ion positif  
B. energi yang diserap pada saat pembentukan ion positif  
C. sama dengan energi ionisasi.  
D. energi yang dibebaskan pada saat pembentukan ion negatif  
E. energi yang diserap pada saat pembentukan ion negatif

## B A B

# 9

# RELATIVITAS



*Sumber: [www.altime-ru](http://www.altime-ru)*

Apa yang terjadi jika kita naik pesawat yang kecepatannya mendekati cahaya? Keadaan itulah yang dipelajari pada relativitas.

Setelah belajar bab ini kalian diharapkan :

1. menjelaskan kaitan relativitas Newton dengan relativitas Einstein,
2. menjelaskan postulat Einstein,
3. menentukan akibat-akibat dari postulat Einstein.

## A. Pendahuluan

### 1. Relativitas Newton

Relativitas sudah dikenal sejak jamannya Newton. Relativitas ini berasal dari kata relatif. Suatu gerak relatif berarti suatu gerak yang tergantung pada suatu acuan tertentu. Acuan itulah tempat suatu pengamat dan pengamat sendiri dapat memiliki dua kemungkinan yaitu pengamat diam dan pengamat bergerak. Dalam kaitannya dengan vektor relatif itu berarti selisih vektor.

Pada relativitas Newton, semua besaran akan sama saat diukur oleh pengamat yang diam maupun pengamat yang bergerak. Besaran yang berubah hanyalah kecepatan relatif dan berlaku persamaan berikut.

$$v_x' = v - v_x \quad \dots\dots\dots(9.1)$$

dengan  $v_x'$  = kecepatan relatif benda terhadap pengamat bergerak

$v_x$  = kecepatan relatif benda terhadap pengamat diam

$v$  = kecepatan pengamat bergerak terhadap pengamat diam



**Gambar 9.1**  
Gerak relatif

#### CONTOH 9.1

Sebuah kereta api bergerak dengan kecepatan 150 km/jam. Pada saat itu Ardi berlari di atas kereta dengan kecepatan 10 km/jam searah kereta. Berapakah kecepatan Ardi tersebut menurut orang yang berada di dalam kereta api dan orang yang berdiri di stasiun ?

#### Penyelesaian

Gerak benda dan acuan pada soal ini dapat digambarkan seperti pada *Gambar 9.1*. Stasiun relatif diam menjadi kerangka acuan O dan kereta api sebagai kerangka acuan O' dengan kecepatan tetap  $v$  terhadap O (stasiun)

$$v = +150 \text{ km/jam}$$

$$v_x' = +10 \text{ km/jam}$$

a. Kecepatan Ardi relatif terhadap kereta api adalah:

$$v_x' = +10 \text{ km/jam}$$

b. Kecepatan Ardi terhadap stasiun adalah  $v_x$ , besarnya memenuhi:

$$\begin{aligned} v_x &= v + v_x' \\ &= 150 + 10 \\ &= 160 \text{ km/jam} \end{aligned}$$

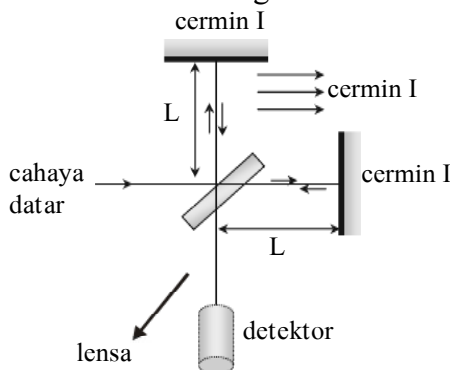
**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Sebuah pesawat perang terbang meninggalkan bumi dengan kecepatan 1200 km/jam. Pada saat itu pesawat melepaskan rudal dengan kecepatan 200 km/jam searah pesawat. Berapakah kecepatan rudal tersebut menurut orang yang berada di bandara lepas landas pesawat tersebut?

## 2. Percobaan Michelson - Morley

Sebelum Maxwell mengusulkan teori tentang cahaya adalah gelombang elektromagnetik yang dapat merambat tanpa medium, para ilmuwan Fisika berpendapat bahwa semua gelombang membutuhkan medium dalam merambat. Muncul teori tentang *hipotesa eter* yang menjadi medium pada jagat raya ini. Michelson dan Morley bekerja sama untuk membuktikan hipotesa itu ternyata hasilnya eter tidak ada.

Dari hasil percobaannya Michelson dan Morley malah menemukan suatu fakta baru. Fakta itu adalah cahaya memiliki kecepatan yang tetap dan sama untuk semua pengamat. Pada saat diukur dengan pendeteksi diam maupun relatif bergerak kecepatan cahaya terukur sebesar  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s. Perhatikan Gambar 9.2. Cahaya yang melalui pemantul cermin I maupun cermin II ternyata memiliki kecepatan sama terbukti tidak ada perbedaan waktu dari kedua gerakan itu.



**Gambar 9.2**  
Percobaan Michelson - Morley



## LATIHAN 9.1

1. Seseorang yang berlari dengan kecepatan konstan 5 km/jam melewati sebuah tugu. Pada saat yang bersamaan seorang pengendara sepeda melewatinya dengan kecepatan 15 km/jam. Berapakah kecepatan sepeda relatif terhadap orang yang berlari ?
2. Jelaskan apakah hasil percobaan Michelson dan Morley memiliki hubungan dengan relativitas Newton dan Einstein. Dasar apakah yang dapat dijelaskan dari percobaan ini .

## B. Relativitas Einstein

### 1. Postulat Einstein

Masih ingat percobaan Michelson dan Morley ? Hasil percobaan Michelson dan Morley itulah yang telah meletakkan dasar dua postulat Einstein. Kedua postulat tersebut kemudian menjadi dasar teori relativitas khusus. Kedua postulat itu adalah :

**Postulat pertama**, hukum fisika dapat dinyatakan dalam persamaan yang berbentuk sama dalam semua kerangka acuan inersia.

**Postulat kedua**, kecepatan cahaya dalam ruang hampa sama besar untuk semua pengamat, tidak tergantung dari keadaan gerak pengamat itu. Kecepatan cahaya di ruang hampa sebesar  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s.

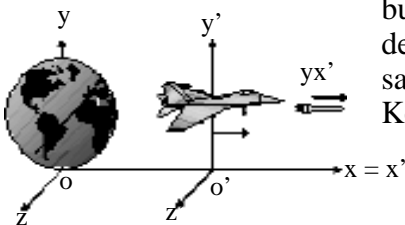
Dengan dasar dua postulat tersebut dan dibantu secara matematis dengan transformasi Lorentz, Einstein dapat menjelaskan relativitas khusus dengan baik. Hal terpenting yang perlu dijelaskan dalam transformasi Lorentz adalah semua besaran yang terukur oleh pengamat diam dan bergerak tidaklah sama kecuali kecepatan cahaya. Besaran-besaran yang berbeda itu dapat dijelaskan seperti dibawah.

### 2. Akibat Postulat Einstein

Pada postulat Einstein telah dijelaskan bahwa besaran yang tetap dan sama untuk semua pengamat hanyalah kecepatan cahaya berarti besaran lain tidaklah sama. Besaran-besaran itu diantaranya adalah kecepatan relatif benda, panjang benda waktu, massa dan energi.

#### a. Kecepatan relatif

Perhatikan Gambar 9.3. Jika ada sebuah pesawat (acuan  $O'$ ) yang bergerak dengan kecepatan  $v$  terhadap bumi (acuan  $O$ ) dan pesawat melepaskan bom (benda) dengan kecepatan tertentu maka kecepatan bom tidaklah sama menurut orang di bumi dengan orang di pesawat. Kecepatan relatif itu memenuhi persamaan berikut.



Gambar 9.3

$$v_x = \frac{v_x' + v}{1 + \frac{v \cdot v_x'}{c^2}} \dots\dots\dots(9.2)$$

dengan :  $v_x$  = kecepatan benda relatif terhadap pengamat diam (m/s)

$v_x'$  = kecepatan benda relatif terhadap pengamat bergerak (m/s)

- $v$  = kecepatan pengamat bergerak (O') relatif terhadap pengamat diam (O)  
 $c$  = kecepatan cahaya

### CONTOH 9.2

Sebuah pesawat ruang angkasa bergerak dengan kecepatan  $0,6c$  meninggalkan bumi. Dari pesawat tersebut ditembakkan peluru dengan kecepatan  $0,5c$  ( $c$  = kecepatan cahaya diruang hampa). Tentukan kecepatan peluru menurut pengamat di bumi jika arah peluru searah pesawat !

#### Penyelesaian

$$v = 0,6 c$$

$$v_x' = 0,5 c$$

Gerak benda dan kerangka acuan (pengamat) dapat digambarkan seperti pada *Gambar 9.3*  $v$  dan  $v_x'$  searah berarti keduanya bernilai positif dan kecepatan peluru relatif terhadap pengamat di bumi memenuhi :

$$\begin{aligned}
 v_x &= \frac{v_x' + v}{1 + \frac{v \cdot v_x'}{c^2}} \\
 &= \frac{0,5 c + 0,6 c}{1 + \left( \frac{0,5 c \cdot 0,6 c}{c^2} \right)} = 0,85 c
 \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Dua pesawat antariksa bergerak dari arah yang berlawanan menuju bumi dengan kecepatan  $0,5 c$  dan  $0,4 c$ . Bila  $c$  = kecepatan cahaya, maka berapakah kecepatan benda pertama relatif terhadap benda kedua?

### b. Kontraksi Panjang

Kontraksi panjang adalah penyusutan panjang suatu benda menurut pengamat yang bergerak. Penyusutan ini memenuhi persamaan berikut.

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \dots\dots\dots(9.3)$$

dengan :  $L$  = panjang benda menurut pengamat yang bergerak relatif terhadap benda

$L_0$  = panjang benda menurut pengamat yang diam relatif terhadap benda

### CONTOH 9.3

Sebuah pesawat yang diam di bumi terukur memiliki panjang 120 m. Kemudian pesawat itu bergerak dengan kecepatan  $0,6c$ . Berapakah panjang roket tersebut menurut pengamat di bumi sekarang ?

#### Penyelesaian

$$L_0 = 120 \text{ m}$$

$$v = 0,6 c$$

Saat pesawatnya bergerak maka pengamat di bumi adalah pengamat yang bergerak terhadap pesawat berarti panjang roket terlihat sebesar  $L$  dan memenuhi :

$$\begin{aligned} L &= L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \\ &= 120 \sqrt{1 - \frac{0,36 c^2}{c^2}} = 96 \text{ cm} \end{aligned}$$

*Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.*

Sebuah roket sewaktu diam di bumi mempunyai panjang 150 m. Kemudian roket itu bergerak dengan kecepatan  $0,8c$ . Berapakah panjang roket tersebut menurut pengamat di bumi saat roket bergerak ?

### c. Dilatasi Waktu

Dilatasi waktu adalah peristiwa pengembangan waktu menurut pengamat yang bergerak. Hubungannya memenuhi persamaan berikut.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \dots\dots\dots(9.4)$$

dengan :  $\Delta t$  = selang waktu menurut pengamat yang bergerak terhadap kejadian

$\Delta t_0$  = selang waktu menurut pengamat yang diam terhadap kejadian

### CONTOH 9.4

Sebuah pesawat ruang angkasa mengitari bumi dengan kecepatan  $0,8 c$  sambil memancarkan sinyal ke bumi. Sinyal diamati dari bumi memiliki periode 12 menit. Jika  $c$  adalah kecepatan cahaya di udara, maka tentukan periode sinyal tersebut sebenarnya!

#### Penyelesaian

$$\Delta t = 12 \text{ menit}$$

$$v = 0,8 c$$

Periode sinyal sebenarnya merupakan pengukuran oleh pengamat di pesawat besarnya adalah  $\Delta t_0$ .

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t_0 = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$= 12 \sqrt{1 - \frac{0,64 c^2}{c^2}} = 7,2 \text{ menit}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Sebuah pesawat antariksa bergerak selama satu tahun menurut waktu pesawat, jika waktu itu sesuai dengan 1,25 tahun waktu di bumi, maka berapakah kecepatan pesawat ?

#### d. Massa dan energi relatif

Perubahan besaran oleh pengamat diam dan bergerak juga terjadi pada massa benda dan energinya.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \dots\dots\dots(9.5)$$

Dan energi benda diam dan bergerak memiliki hubungan sebagai berikut.

- (a) Energi total :  $E = mc^2$
- (b) Energi diam :  $E_0 = m_0 c^2$  .....(9.6)
- (c) Energi kinetik :  $E_k = E - E_0$



**CONTOH 9.5**

Sebuah benda memiliki massa diam 4 kg. Jika benda tersebut bergerak dengan kecepatan  $0,6 c$  ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s) maka tentukan :

- massa bergerakinya,
- energi diam benda
- energi relativitas benda
- energi kinetik benda !

**Penyelesaian**

$$m_0 = 4 \text{ kg}$$

$$v = 0,6 c$$

- massa bergerakinya atau massa relativistiknya memenuhi :

$$\begin{aligned} m &= \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ &= \frac{4}{\sqrt{1 - \frac{0,36 c^2}{c^2}}} = 5 \text{ kg} \end{aligned}$$

- Energi diam benda memenuhi :

$$\begin{aligned} E_0 &= m_0 c^2 \\ &= 4 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 3,6 \cdot 10^{17} \text{ joule} \end{aligned}$$

- Energi relativistik benda memenuhi :

$$\begin{aligned} E &= m c^2 \\ &= 5 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 4,5 \cdot 10^{17} \text{ joule} \end{aligned}$$

- Energi kinetik benda sebesar :

$$\begin{aligned} E_k &= E - E_0 \\ &= 4,5 \cdot 10^{17} - 3,6 \cdot 10^{17} = 0,9 \cdot 10^{17} \text{ joule} \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Sebuah benda diam bermassa 6 kg. Kemudian benda bergerak dengan kecepatan  $0,8 c$  ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s) maka tentukan :

- massa bergerakinya,
- energi diam benda
- energi relativitas benda
- energi kinetik benda!



## LATIHAN 8.2

- Menurut pengamat disebuah planet ada dua pesawat antariksa yang mendekatnya dari arah yang berlawanan, masing-masing adalah pesawat A yang kecepatannya  $0,50c$  dan pesawat B yang kecepatannya  $0,40c$  ( $c$  = cepat rambat cahaya). Menurut pilot pesawat A berapakah besar kecepatan pesawat B ?
- Periode suatu pendulum di muka bumi besarnya 3,0 detik. Bila pendulum tersebut diamati oleh seseorang yang bergerak relatif terhadap bumi dengan kecepatan  $0,95c$  ( $c$  = kecepatan cahaya), maka tentukan periode pendulum tersebut !
- Sebuah pesawat sewaktu masih diam di bumi diukur panjangnya sebesar 100 m. Kemudian pesawat tersebut bergerak dengan kecepatan  $0,8c$  meninggalkan bumi. Menurut orang di bumi berapakah penyusutan panjang roket tersebut ?
- Suatu bujur sangkar dengan sisi 10 cm diletakkan dengan salah satu sisinya pada sumbu X. Seorang pengamat bergerak dengan kecepatan  $0,8c$  pada arah sumbu X, maka akan melihat bujur sangkar tersebut dengan luas A. Berapakah nilai A ?
- Sebuah elektron mempunyai massa diam  $m_0$  bergerak dengan kecepatan  $\frac{1}{2}c$ , maka menurut teori relativitas berapakah energi kinetiknya ?
- Sebuah pesawat antariksa bergerak dengan energi kinetiknya sebesar  $\frac{1}{12}$  kali energi diamnya. Jika  $c$  = kecepatan cahaya, maka tentukan laju pesawat pada saat itu !

## Rangkuman Bab 9

A. Akibat-akibat postulat Einstein adalah :

$$1. \text{ kecepatan relatif : } v_x = \frac{v_x' + v}{1 + \frac{v \cdot v_x'}{c^2}}$$

$$2. \text{ kontraksi panjang : } L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$3. \text{ dilatasi waktu : } \Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$4. \text{ massa relatif : } m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

5. energi

$$\text{diam : } E_0 = m_0 c^2$$

$$\text{relatif : } E = mc^2$$

$$\text{kinetik : } E_k = E - E_0$$

## Evaluasi Bab 9

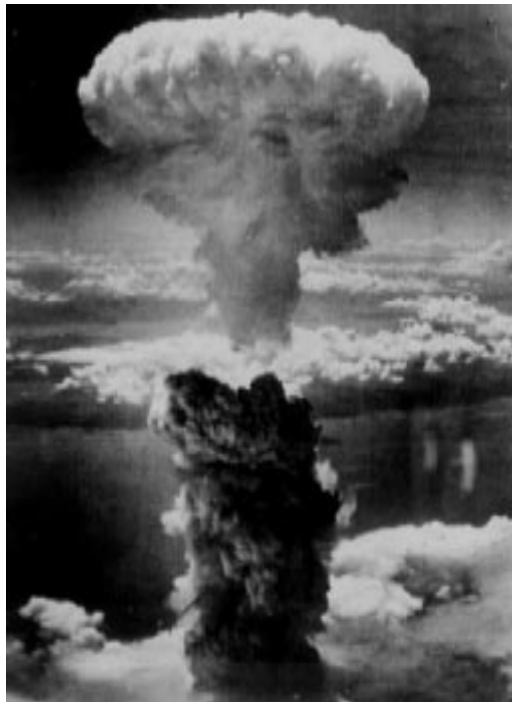
Pilihlah jawaban yang benar pada soal-soal berikut dan kerjakan di buku tugas kalian.

- Sebuah kereta api bergerak dengan kecepatan tetap 18 km/jam melewati stasiun. Ari yang berada di atas kereta api berlari dengan kecepatan 5 km/jam terhadap kereta api dengan arah berlawanan. Jika Ira yang duduk di stasiun melihat Ari, maka menurut Ira kecepatan Ari adalah ....  
 A. 13 km/jam                      D. 23 km/jam  
 B. 15 km/jam                      E. 25 km/jam  
 C. 18 km/jam
- Sebuah pesawat bergerak dengan kecepatan  $0,85c$  terhadap bumi. Dari pesawat ditembakkan peluru dengan kecepatan  $0,5c$  searah dengan pesawat. Kecepatan peluru terhadap bumi adalah ....  
 A.  $C$                                       D.  $0,6c$   
 B.  $0,2c$                                       E.  $0,8c$   
 C.  $0,5c$
- Perbandingan dilatasi waktu untuk sistem yang bergerak pada kecepatan  $0,8c$  ( $c$  = cepat rambat cahaya) dengan sistem yang bergerak dengan kecepatan  $0,6c$  adalah ....  
 A.  $3 : 4$                                       D.  $9 : 16$   
 B.  $4 : 3$                                       E.  $16 : 9$   
 C.  $9 : 2$
- Sebuah roket waktu diam di bumi mempunyai panjang 100 m. Roket tersebut bergerak dengan kecepatan  $0,8c$ . Menurut orang di bumi panjang roket tersebut adalah ....  
 A. 50 m                                      D. 80 m  
 B. 60 m                                      E. 100 m  
 C. 70 m
- Bila laju partikel  $0,6c$ , maka perbandingan massa relativistik partikel itu terhadap massa diamnya adalah ....  
 A.  $5 : 3$                                       D.  $25 : 4$   
 B.  $25 : 9$                                       E.  $8 : 5$   
 C.  $5 : 4$
- Sebuah partikel bergerak dengan laju  $v = \frac{1}{2}c\sqrt{3}$ . Jika  $M_0$  = massa diam,  $M$  = massa bergerak,  $E_k$  = energi kinetik dan  $E_0$  = energi diam, maka berlaku ....  
 A.  $M = \frac{1}{2}M_0$  ;  $E_k = \frac{1}{2}E_0$   
 B.  $M = \frac{3}{4}M_0$  ;  $E_k = E_0$   
 C.  $M = \frac{3}{2}M_0$  ;  $E_k = E_0$   
 D.  $M = 2M_0$  ;  $E_k = E_0$   
 E.  $M = 2M_0$  ;  $E_k = 2E_0$
- Suatu partikel bertenaga rehat  $E_0$  sedang bergerak dengan tenaga kinetik  $E_k$  dan kecepatan  $v$  sedemikian rupa hingga  $\frac{v}{c} = 0,9$  .  $\frac{E_k}{E_0}$  untuk partikel besarnya ....  
 A. 2    D. 9  
 B. 4    E. 5  
 C. 6,1
- Sebuah benda berkecepatan  $0,6c$  memiliki energi total  $(1,5 \times 10^{-3} \text{ gram})c^2$ . Jika  $c$  adalah kecepatan cahaya, maka saat benda tersebut berkecepatan  $0,8c$ , energi total menjadi ....  
 A.  $(2 \times 10^{-3} \text{ gram})c^2$   
 B.  $(1,5 \times 10^{-3} \text{ gram})c^2$   
 C.  $(1,2 \times 10^{-3} \text{ gram})c^2$   
 D.  $(1,13 \times 10^{-3} \text{ gram})c^2$   
 E.  $(9 \times 10^{-4} \text{ gram})c^2$

**B A B**

**10**

# **FISIKA INTI**



*Sumber: ms.wikipedia.org*

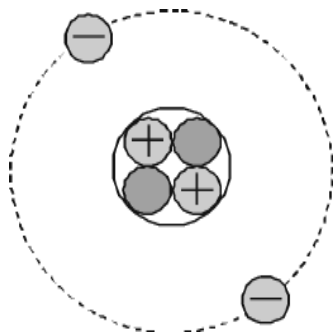
Pernahkah kalian berfikir tentang bom nuklir, apakah hanya merugikan saja atau ada pemanfaatan yang lain.

Pada buku inilah kalian dapat belajar tentang fisika nuklir. Oleh sebab itu setelah belajar bab ini diharapkan kalian dapat :

1. menjelaskan tentang inti atom,
2. menentukan peluruhan suatu isotop,
3. menentukan reaksi inti.

## A. Gaya Ikat Inti, Energi Ikat Inti dan Defek Massa

Pada bab 4 kalian telah belajar tentang gaya elektrostatis. Dua muatan sejenis yang berdekatan akan mendapat gaya tolak listrik (gaya elektrostatis). Bagaimana halnya dengan inti atom? Walaupun antara proton dan neutron ada gaya tarik gravitasi tetapi gaya ini cukup kecil dibanding gaya tolak elektrostatis. Jika tidak ada gaya lain pastilah inti atom akan bercerai-berai. Gaya lain inilah yang kemudian dikenal dengan nama *gaya ikat inti* dan menimbulkan *energi ikat inti*.



**Gambar 10.1**

Inti atom  ${}^4_2\text{He}$  memiliki dua proton dan dua elektron.

Energi ikat inti ini bersal dari massa yang hilang. Adanya gaya ikat inti dan energi ikat inti ini dibuktikan pada kenyataan bahwa massa inti atom tidaklah sama dengan massa penyusunnya. Sejumlah proton dan sejumlah neutron yang bermassa  $M$  akan mengalami pengurangan massa saat proton dan neutron tersebut membentuk inti ( $\text{massa inti} < M$ ). Pengurangan massa inti ini dinamakan *defek massa*.

Kemanakah massa yang hilang pada inti itu? Kenyataan ini dapat dijelaskan dengan fisika modern dengan baik. Masih ingat relativitas Einstein? Pada relativitas Einstein dijelaskan tentang kesetaraan massa dan energi dengan energi relativistik  $E = mc^2$ . Dengan konsep ini dapat dijelaskan bahwa defek massa inti atom membentuk energi ikat inti dan medan gaya inti. Berarti energi ikat inti atom dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$E = \Delta m c^2 \quad \dots\dots\dots(10.1)$$

dengan  $E$  = energi ikat inti (joule)

$\Delta m$  = defek massa (kg)

$c$  =  $3 \cdot 10^8$  m/s

Jika  $\Delta m$  dalam satuan sma, maka persamaan 10.1 dapat diubah menjadi berikut:

$$E = \Delta m \cdot 931,5 \text{ MeV} \quad \dots\dots\dots(10.2)$$

Sedangkan defek massa  $\Delta m$  dari suatu inti atom  ${}_Z^AX$  akan memenuhi hubungan berikut.

$$m = (2m_p + (A - Z)m_n) - m_x \quad \dots\dots\dots(10.3)$$

dengan  $m_p$  = massa proton

$m_n$  = massa neutron

$m_x$  = massa inti

Untuk lebih telitinya massa elektron dapat itu diperhitungkan sebagai massa penyusun inti, tetapi karena kecil biasanya dapat diabaikan.

### CONTOH 10.1

Massa proton dan neutron dapat digunakan pendekatan masing-masing sebesar  $1,0078 \text{ sma}$  dan  $1,0087 \text{ sma}$ . Jika proton dan neutron membentuk inti  ${}^7_3\text{Li}$  ternyata massa inti Litium tersebut sebesar  $7,018 \text{ sma}$ , maka tentukan :

- defek massa inti Litium
- energi ikat inti Litium dan

#### Penyelesaian

$$m_p = 1,0078 \text{ sma}$$

$$m_n = 1,0087 \text{ sma}$$

$$m_x = 7,018 \text{ sma}$$

Inti Litium dilambangkan  ${}^7_3\text{Li}$  berarti :

$Z = 3$  berarti jumlah proton : 3

$A = 7$  berarti jumlah netron :  $7 - 3 = 4$

- Defek massa inti Li dapat dihitung sebagai berikut:

Penyusun :	$3 m_p = 3 \cdot 1,0078 = 3,0234 \text{ sma}$	
	$4 m_n = 4 \cdot 1,0087 = 4,0348 \text{ sma}$	
		$7,0582 \text{ sma}$
massa inti Li :		$7,0180 \text{ sma}$
Defek massa		$\Delta m = 0,0402 \text{ sma}$

- Energi ikat inti Litium sesuai persamaan 12.5 sehingga diperoleh sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 E &= \Delta m \cdot 931,5 \text{ MeV} \\
 &= 0,0402 \cdot 931,5 \\
 &= 37,4463 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Massa inti karbon  ${}^{12}_6\text{C}$  adalah  $12 \text{ sma}$ . Jika setiap proton dan netron massanya sebesar  $1,0078 \text{ sma}$  dan  $1,0087 \text{ sma}$  dan  $1 \text{ sma}$  setara dengan  $931 \text{ MeV}$  maka tentukan :

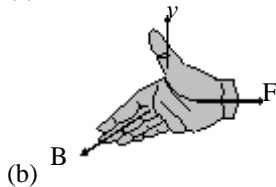
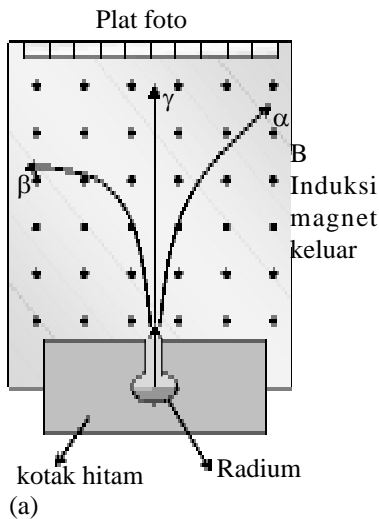
- defek massa inti karbon,
- energi ikat inti karbon, dan

## B. Radioaktivitas

### 1. Gejala Radioaktivitas

#### a. Pemancaran Sinar Radioaktif

Pada tahun 1899, *Ernest Rutherford* melakukan percobaan dengan menempatkan radium dalam kotak hitam seperti pada *Gambar 10.2*. Pada percobaan ini diperoleh ada tiga sinar yang dipancarkan bahan radioaktif radium. Ketiga komponen sinar tersebut terpisah setelah melewati daerah bermedan magnet *B*. Ada yang lurus, ada yang dibelokkan ke kiri dan ada yang ke kanan.



**Gambar 10.2**

(a) Percobaan Ernest Rutherford dan (b) kaidah tangan kanan pada partikel  $\alpha$ .

*Sinar pertama* diteruskan atau bergerak lurus, berarti sinar ini tidak bermuatan dan bukan sebuah partikel. Sinar ini ditemukan berupa sinar  $\gamma$ . Sinar  $\gamma$  merupakan radiasi *elektromagnetik* dan memiliki daya tembus terbesar tetapi daya ionisasi paling lemah.

*Sinar kedua* dibelokkan ke kanan, lihat *Gambar 12.3(a)*. Partikel ini dapat ditentukan jenisnya dengan pengaruh Gaya Lorentz. Dan dapat digunakan kaidah tangan kanan. Sesuai kaedah tangan kanan *Gambar 12.3(b)* maka partikel ini bermuatan positif sehingga akan dibelokkan medan listrik juga. Sinar ini ditemukan berupa partikel-partikel alfa (sinar  $\alpha$ ). Partikel  $\alpha$  merupakan inti helium  ${}^4_2\text{He}$ . Daya ionisasi sinar  $\alpha$  paling kuat tetapi daya tembus paling lemah.

*Sinar ketiga* dibelokkan ke kiri. Karena arah beloknya kebalikan sinar  $\alpha$  maka sinar ini pastilah bermuatan negatif. Sama halnya sinar  $\alpha$ , sinar ini juga dibelokkan oleh medan listrik. Setelah dipelajari sinar ketiga ini adalah elektron bergerak cepat yang dinamakan sinar  $\beta$ . Daya tembus dan daya ionisasi sinar  $\beta$  berada diantara kedua sinar yang lain.

#### b. Kestabilan Inti

Di dalam ditemukan atom-atom atau nuklida-nuklida yang memiliki nomor atom sama tetapi nomor massa berbeda, misalnya  ${}^3_2\text{He}$  dan  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{12}_6\text{C}$  dan  ${}^{14}_6\text{C}$ . Pada atom-atom yang nomor atomnya sama berarti pada intinya memiliki jumlah proton sama, sedangkan perbedaan nomor massa menunjukkan bahwa jumlah neutron dalam intinya berbeda. Atom atau nuklida yang memiliki sifat ini disebut *Isotop*.

Inti-inti dengan nomor atom 20 ke bawah ( $Z \leq 20$ ) akan stabil jika jumlah protonnya sama dengan jumlah neutronnya ( $N = Z$ ). Contohnya adalah  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{22}_{11}\text{Na}$ ,  ${}^4_2\text{He}$  dan  ${}^{12}_6\text{C}$ . Berarti  ${}^3_2\text{He}$  dan  ${}^{14}_6\text{C}$  tidaklah stabil atau termasuk radioisotop yang dapat memancarkan zat-zat radioaktif. Untuk inti dengan  $Z > 20$  yang akan stabil jika nilai  $N$  lebih besar dari  $Z$  ( $N/Z > 1$ ) berarti jumlah netronnya harus lebih banyak dari jumlah proton dalam inti.

## 2. Peluruhan Inti

Seperti penjelasan di depan bahwa inti-inti yang tidak stabil akan memancarkan zat-zat radioaktif. Misalnya memancarkan sinar  $\alpha$ , sinar ini adalah inti helium  ${}_2\alpha^4$  berarti saat memancarkan sinar  $\alpha$  akan terpancar 2 proton dan 2 neutron. Dengan pemancaran ini maka bahan yang meluruh akan mengalami pengurangan partikel-partikel penyusunnya. Karena sifatnya inilah kemudian peristiwa pemancaran sinar-sinar radioaktif pada bahan radioaktif ini dinamakan *peluruhan*.

Misalnya mula-mula ada  $N_0$  partikel. Partikelnya menjadi  $\frac{1}{2} N_0$  dalam waktu  $T$ , menjadi  $\frac{1}{4} N_0$  dalam  $2T$  dan menjadi  $\frac{1}{8} N_0$  dalam  $3T$ . Perubahan  $N$  ini akan memenuhi deret dengan persamaan seperti berikut.

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \dots\dots\dots(10.4)$$

dengan  $N$  = jumlah partikel sisa

$N_0$  = jumlah partikel mula-mula

$t$  = waktu meluruh

$T$  = waktu paro

### CONTOH 10.2

Suatu unsur radioaktif meluruh dan tinggal 25% dari jumlah semula setelah 20 menit. Bila mula-mula massa unsur tersebut 120 gr, maka setelah setengah jam meluruh tentukan massa sisa unsur !

#### Penyelesaian

$$m_0 = 120 \text{ gram}$$

$$t_1 = 20 \text{ menit, } m_1 = 25\% \text{ } m_0 = \frac{1}{4} m_0$$

$$t_2 = \frac{1}{2} \text{ jam} = 30 \text{ menit}$$

Dari nilai  $m_1$  dan  $t_1$  dapat ditentukan waktu paro unsur tersebut.

$$m_1 = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t_1}{T}}$$

$$\frac{1}{4} m_0 = m_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{20}{T}}$$

$$\text{berarti : } \frac{20}{T} = 2 \quad \text{dan} \quad T = 10 \text{ menit}$$

Dari nilai  $T$  dapat diperoleh massa sisa setelah  $t_2$  sebesar:

$$\begin{aligned} m_2 &= m_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t_2}{T}} \\ &= 120 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{30}{10}} = \frac{120}{8} = 15 \text{ gr} \end{aligned}$$



## C. Reaksi Inti

### 1. Pengertian Reaksi Inti

Seperti penjelasan sebelumnya bahwa inti-inti atom dapat memancarkan zat-zat radioaktif sehingga akan membentuk inti baru. Selain itu ternyata inti juga dapat pecah menjadi dua inti atau lebih yang hampir sama dan dapat pula bergabung. Peristiwa-peristiwa perubahan inti menjadi inti baru ini dinamakan *reaksi inti*. Dalam suatu reaksi inti ternyata berlaku beberapa kekekalan yaitu : *hukum kekekalan nomor atom, hukum kekekalan nomor massa dan kekekalan massa - energi*.

Dari penjelasan di atas maka pada suatu reaksi inti akan memiliki jumlah nomor atom dan nomor massa sebelum dan sesudah reaksi sama besar. Perhatikan contoh berikut.

#### CONTOH 10.3

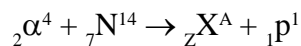
Sebuah partikel  $\alpha$  ditembakkan pada inti  ${}^7_{14}\text{N}$ . Jika setelah penembakan sebuah proton dapat dibebaskan maka inti apakah yang akan terbentuk!

#### Penyelesaian

Partikel alfa :  ${}_2\alpha^4$

proton :  ${}_1\text{p}^1$

Reaksi yang terjadi dapat dituliskan :



Nomor atom kekal :  $2 + 7 = Z + 1$   
 $Z = 8$

Nomor massa kekal :  $4 + 14 = A + 1$   
 $A = 17$

Berarti :  ${}_8\text{X}^{17}$  adalah Oksigen  ${}_8\text{O}^{17}$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Inti atom  ${}^7_{14}\text{N}$  ditembak dengan partikel alfa, sehingga melepaskan sebuah proton, unsur apakah yang akan terbentuk ?

### 2. Hukum Kekekalan Massa - Energi

Dalam suatu reaksi inti tidak ada yang memenuhi kekekalan massa begitu pula kekekalan energi. Berarti pada reaksi inti selalu terjadi perubahan massa. Perubahan massa inilah yang diimbangi dengan perubahan energi sesuai

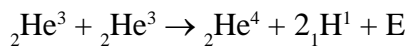
kesetaraan massa - energi relativistik. Sehingga yang lebih tepat dapat dijelaskan bahwa pada reaksi inti terjadi *kekekalan massa -energi*. Jika terjadi penambahan massa maka reaksinya membutuhkan energi. Begitu pula saat terjadi kehilangan massa maka reaksinya akan menghasilkan energi.

Dua reaksi di atas merupakan salah satu kemungkinan reaksi yang terjadi. Banyak kemungkinan lain yang bisa terjadi misalnya  ${}_1\text{H}^2$  bereaksi lagi dengan  ${}_1\text{H}^1$ . Hal penting yang perlu diperhatikan pada reaksi itu adalah timbulnya energi. Kesetaraan massa dan energi reaksi sesuai persamaan berikut.

$$E = \Delta m \cdot 931,5 \text{ MeV} \dots\dots\dots(10.5)$$

### CONTOH 10.4

Di matahari terjadi reaksi fusi seperti di bawah.



Diketahui massa inti  ${}_1\text{H}^1 = 1,0081 \text{ sma}$ ; massa inti  ${}_2\text{He}^3 = 3,0169 \text{ sma}$ ; massa inti  ${}_2\text{He}^4 = 4,0089 \text{ sma}$ . Bila 1 sma setara dengan energi 931 MeV, maka tentukan energi yang dihasilkan pada setiap reaksi fusi di atas !

#### Penyelesaian

Massa pereaksi  $m_0$  :

$$\begin{aligned} m_0 &= 2m({}_2\text{He}^3) \\ &= 2 \cdot 3,0169 = 6,0338 \text{ sma} \end{aligned}$$

massa hasil reaksi  $m$  :

$$\begin{aligned} m &= m({}_2\text{He}^4) + 2m({}_1\text{H}^1) \\ &= 4,0039 + 2 \cdot 1,0081 = 6,0201 \text{ sma} \end{aligned}$$

Perubahan massa dalam reaksi inti (massa berkurang) sebesar:

$$\Delta m = m_0 - m = 6,0338 - 6,0201 = 0,0137 \text{ sma}$$

Karena massa berkurang berarti akan dihasilkan energi yaitu sebesar

$$\begin{aligned} E &= \Delta m \cdot 931 \\ &= 0,0157 \cdot 931 = 12,7547 \text{ MeV} \end{aligned}$$

**Setelah memahami contoh di atas dapat kalian coba soal berikut.**

Massa inti  ${}_2\text{He}^4$  dan  ${}_1\text{H}^2$  masing-masing 4,002603 sma dan 2,014102 sma. Jika 1 sma = 931 MeV, maka berapakah energi minimum yang diperlukan untuk memecah partikel alpha menjadi dua deuteron ?

## Rangkuman Bab 10

1. Isotop disimbulkan :  ${}_Z^AX^A$

$Z$  = nomor atom yang menyatakan jumlah proton

$A$  = nomor massa yang menyatakan jumlah netron dan proton dalam inti

2. Inti atom terdiri dari proton dan netron. Ikatan antar neutron dapat terjadi karena ada defek massa.

$$\Delta m = (Zm_p + (A - Z)m_n) - m_x$$

Energi ikatnya memenuhi :

$$E = \Delta m \cdot 931 \text{ Mev}$$

$\Delta m$  dalam sma.

3. Isotop ada yang stabil dan ada yang tidak stabil.

a. Isotop stabil memiliki ciri :

- untuk  $Z < 20 \rightarrow N = Z$
- untuk  $Z > 20 \rightarrow N > Z$
- untuk  $Z > 83$  tidak ada yang stabil

$N$  = jumlah netron dan  $Z$  jumlah proton.

b. Isotop yang tidak stabil akan mengalami peluruhan.

Sisa peluruh  $\frac{t}{T}$  memenuhi :

$$N = N_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}}$$

Konstanta peluruhan dismbulkan  $\lambda$  .

$$\lambda = \frac{0,693}{T}$$

4. Reaksi Inti

Reaksi inti adalah perubahan yang terjadi dengan melibatkan inti atom. Pada reaksi inti berlaku :

- a. Hukum Kekekalan jumlah nomor atom.
- b. Hukum Kekekalan jumlah nomor massa.
- c. Hukum Kekekalan massa - Energi

$$E = \Delta m \cdot 931 \text{ MeV}$$

$\Delta m$  = m sebelum reaksi - M setelah reaksi

## Evaluasi Bab

- Suatu atom X mempunyai 42 proton, 42 elektron, dan 65 neutron. Simbol untuk atom ini adalah ....
 

A. ${}_{42}^{147}\text{X}$	D. ${}_{42}^{107}\text{X}$
B. ${}_{42}^{65}\text{X}$	E. ${}_{84}^{107}\text{X}$
C. ${}_{84}^{147}\text{X}$	
- Dibandingkan dengan jumlah massa nukleon-nukleon dalam suatu inti, massa inti tersebut adalah ....
  - lebih besar
  - sama atau lebih besar
  - sama atau lebih kecil
  - lebih kecil
  - mungkin lebih kecil dan mungkin pula lebih besar
- Jika massa inti  ${}^4_2\text{He} = 4,0020 \text{ sma}$ , massa proton =  $1,0078 \text{ sma}$ , massa neutron =  $1,0087 \text{ sma}$  dan  $1 \text{ sma} = 930 \text{ MeV}$ , maka energi ikat inti  ${}^4_2\text{He}$  adalah ....
 

A. 23 MeV	D. 43,44 MeV
B. 23,44 MeV	E. 46,22 MeV
C. 28,83 MeV	
- Salah satu ciri dari sinar alfa ( $\alpha$ ) adalah ....
  - lintasanya tidak membelok dalam medan magnet
  - bahwa ia tidak bermuatan
  - bahwa sesungguhnya ia sama dengan sinar katoda
  - bahwa ia terdiri dari inti-inti atom helium
  - bahwa ia terdiri dari atom hidrogen
- $\text{Bi}^{210}$  yang waktu paruhnya 5 jam meluruh menurut  $\text{Bi}^{210} \rightarrow \text{Po}^{210} + \beta^-$ . Jika mula-mula terdapat 72 gr  $\text{Bi}^{210}$ , maka setelah 15 jam dihasilkan  $\text{Po}^{210}$  sebanyak ....
 

A. 9 gr	D. 48 gr
B. 24 gr	E. 63 gr
C. 32 gr	
- Suatu batu diteliti mengandung Uranium U dan Timbal Pb. 75 % batu mengandung timbal dan sisanya adalah uranium. Jika diketahui bahwa uranium meluruh menjadi timbal dengan waktu paruh 100 tahun, maka umur batu tersebut adalah ....
 

A. 50 tahun	D. 800 tahun
B. 200 tahun	E. 1600 tahun
C. 400 tahun	
- Dalam reaksi berikut  ${}^{14}_7\text{N} + \alpha \rightarrow \text{X} + \text{p}$  dilepaskan sejumlah energi. Pada persamaan reaksi di atas, X adalah ....
 

A. ${}^8_8\text{O}^{16}$	D. ${}^8_8\text{O}^{18}$
B. ${}^{16}_7\text{N}$	E. ${}^{16}_9\text{F}$
C. ${}^{17}_8\text{O}$	
- Jika suatu neutron dalam inti berubah menjadi proton, maka inti itu memancarkan ....
 

A. partikel alfa	D. proton
B. partikel beta	E. deuteron
C. sinar gamma	
- ${}^{238}_{92}\text{U}$  meluruh menjadi isotop timbal  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$  oleh emisi 8 partikel alfa dan oleh emisi elektron sebanyak ....
 

A. 6	D. 3
B. 5	E. 2
C. 4	
- Massa inti  ${}^4_2\text{He}$  dan  ${}^2_1\text{H}$  masing-masing  $4,002603 \text{ sma}$  dan  $2,014102 \text{ sma}$ . Jika  $1 \text{ sma} = 931 \text{ MeV}$ , maka energi minimum yang diperlukan untuk memecah partikel alpha menjadi dua neutron adalah ....
 

A. 4 MeV	D. 34 MeV
B. 14 MeV	E. 44 MeV
C. 24 MeV	

## Glosarium

Amplitudo	: simpangan getar maksimum
Audiosonik	: bunyi yang frekuensinya antara 20 s.d 20.000 Hz
Defek massa	: massa yang hilang dan berubah menjadi energi (energi ikat inti)
Difraksi	: pelenturan gelombang
Dilatasi waktu	: pengembangan waktu menurut pengamat yang bergerak
Elektron	: partikel negatif yang mengorbit mengelilingi inti atom pada tingkat energi tertentu
Fase	: bagian atau tahapan gelombang
Fasor	: diagram fase vektor
Fluks listrik	: jumlah garis-garis gaya listrik yang menembus secara tegak lurus pada suatu bidang
Fluks magnet	: jumlah garis-garis gaya magnet yang menembus secara tegak lurus pada suatu bidang
Foton	: paket-paket energi gelombang elektromagnetik
Frekuensi	: banyaknya gelombang tiap satu detik
Gelombang elektromagnetik	: gelombang yang tidak membutuhkan medium untuk merambat
Gelombang longitudinal	: gelombang yang arah rambatnya sejajar arah getarnya
Gelombang mekanik	: gelombang yang membutuhkan medium untuk merambat
Gelombang stasioner	: gelombang yang amplitudonya berubah-ubah terhadap posisinya
Gelombang transversal	: gelombang yang arah rambatnya tegak lurus arah getarnya
Generator	: alat yang dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik
Induksi magnet	: medan magnet yang disebabkan oleh kawat berarus
Induktor	: kumparan (solenoida) yang dapat menghasilkan arus induksi
Infrasonik	: bunyi yang frekuensinya di bawah 20 Hz
Intensitas	: energi yang dibawah gelombang per satuan waktu per satuan luas
Interferensi	: penggabungan dua gelombang atau lebih
Impedansi	: hambatan pengganti rangkaian RLC arus bolak-balik
Isotop	: inti-inti atom yang memiliki nomor atom sama tetapi nomor massa berbeda
Kapasitor	: komponen penyimpan muatan listrik
Kontraksi panjang	: pemendekan panjang benda menurut pengamat yang bergerak
Medan listrik	: daerah yang masih merasakan pengaruh gaya listrik (gaya Coulomb)
Neutron	: partikel netral penyusun inti atom
Panjang gelombang	: jarak dua titik terdekat yang sefase atau jarak satu gelombang
Periode	: waktu yang diperlukan untuk merambat satu gelombang
Perut	: titik terjadinya interferensi maksimum pada perpaduan gelombang (gelombang stasioner)
Polarisasi	: pengurangan komponen gelombang sehingga intensitasnya tinggal setengahnya
Proton	: partikel positif penyusun inti atom
Radiasi	: pancaran gelombang elektromagnetik
Radioaktivitas	: kegiatan peluruhan isotop-isotop tidak stabil
Reaktansi	: hambatan yang ditimbulkan oleh komponen yang dipengaruhi frekuensi sumber arus
Resonansi	: bergetarnya suatu benda karena getaran benda lain dan frekuensinya sama
Solenoida	: penghantar yang dililitkan memanjang
Simpul	: titik terjadinya interferensi minimum pada perpaduan gelombang (gelombang stasioner)
Taraf intensitas	: tingkat kebisingan
Transformator	: alat yang dapat digunakan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan arus bolak-balik
Ultrasonik	: bunyi yang frekuensinya di atas 20.000 Hz

## Ketetapan Fisika

Besaran	Simbol	Nilai tetapannya
Kecepatan cahaya	(c)	$3 \times 10^8$ m/s
Konstanta gravitasi	G	$6,67 \times 10^{-11}$ Nm <sup>2</sup> /mg <sup>2</sup>
Tetapan Stefan-Boltzmann	( $\sigma$ )	$5,67 \times 10^{-8}$ W <sup>2</sup> /K <sup>4</sup>
Tetapan Boltzmann's	(k)	$1,38 \times 10^{-23}$ J/K
Tetapan Avogadro	N <sub>A</sub>	$6,022 \times 10^{23}$ mol <sup>-1</sup>
Konstanta gas	R = N <sub>A</sub> k	8,31 J/mol K
Hukum Coulomb's	$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	$8,99 \times 10^9$ N m <sup>2</sup> /C <sup>2</sup>
Muatan elektron	e	$1,60 \times 10^{-19}$ C
Permittivitas vakum	$\epsilon_0$	$8,85 \times 10^{-12}$ C/Nm <sup>2</sup>
Permeabilitas vakum	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7}$ T m/A = $1,26 \times 10^{-6}$ T m/A
Tetapan planck's	h h = h/2 $\pi$	$6,63 \times 10^{-34}$ J s $1,05 \times 10^{-34}$ J s
Massa atom	u	$1,66 \times 10^{-27}$ kg = 931 MeV
Massa elektron	m <sub>e</sub>	$9,10939 \times 10^{-31}$ kg = $5,94 \times 10^{-4}$ u = 0,511 MeV
Massa neutron	m <sub>n</sub>	$1,67500 \times 10^{-27}$ kg = 1,008665 u = 939,57 MeV
Massa proton	m <sub>p</sub>	$1,67565 \times 10^{-27}$ kg = 1,007267 u = 938,28 MeV

## Konversi Satuan

- Massa 1 kg =  $10^3$  g = 8,64 x 104 s  
1 g =  $10^{-3}$  kg 1 tahun = 365 hari =  $8,76 \times 10^3$  jam  
1 u =  $1,66 \times 10^{-27}$  kg =  $5,26 \times 10^5$  min =  $3,16 \times 10^7$  s  
1 ton = 1000 kg
- Panjang 1 Å =  $10^{-10}$  m  
1 nm =  $10^{-9}$  m  
1 cm =  $10^{-2}$  m = 0,394 in  
1 m =  $10^{-3}$  km = 3,28 ft = 39,4 in  
1 km =  $10^3$  = 0,621 mi  
1 in = 2,54 cm =  $2,54 \times 10^{-2}$  m  
1 ft = 0,305 m = 30,5 cm  
1 pc (parsec) =  $3,09 \times 10^{13}$  km
- Luas 1 cm<sup>2</sup> =  $10^{-4}$  m<sup>2</sup> = 0,1550 in.<sup>2</sup>  
=  $1,08 \times 10^{-3}$  ft<sup>2</sup>  
1 m<sup>2</sup> =  $10^4$  cm<sup>2</sup> = 10,76 ft<sup>2</sup> = 1550 in<sup>2</sup>  
1 in<sup>2</sup> =  $6,94 \times 10^{-3}$  ft<sup>2</sup> = 6,45 cm<sup>2</sup>  
=  $6,45 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>  
1 ft<sup>2</sup> = 144 in.<sup>2</sup> =  $9,29 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>  
= 929 cm<sup>2</sup>
- Volume 1 cm<sup>3</sup> =  $10^{-6}$  m<sup>3</sup> =  $3,35 \times 10^{-5}$  ft<sup>3</sup>  
=  $6,10 \times 10^{-3}$  in<sup>3</sup>  
1 m<sup>3</sup> =  $10^6$  cm<sup>3</sup> = 10<sup>3</sup> L = 35,3 ft<sup>3</sup>  
=  $6,10 \times 10^4$  in.<sup>3</sup> = 264 gal  
1 liter = 10<sup>3</sup> cm<sup>3</sup> = 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>  
= 0,264 gal  
1 in.<sup>3</sup> =  $5,79 \times 10^{-4}$  ft<sup>3</sup> = 16,4 cm<sup>3</sup>  
=  $1,64 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>  
1 ft<sup>3</sup> = 1728 in.<sup>3</sup> = 7,48 gal  
= 0,0283 m<sup>3</sup> = 28,3 L  
1 gal = 231 in.<sup>3</sup> = 0,134 ft<sup>3</sup> =  
3,785 L
- Waktu 1 jam = 60 min = 3600 s  
1 hari = 24 jam = 1440 min
- Kecepatan 1 m/s = 3,60 km/h = 3,28 ft/s  
= 2,24 mi/h  
1 km/h = 0,278 m/s = 0,621 mi/h = 0,911 ft/s  
1 ft/s = 0,682 mi/h = 0,305 m/s = 1,10 km/h  
1 mi/h = 1,467 ft/s = 1,609 km/h = 0,447 m/s  
60 mi/h = 88 ft/s
- Gaya 1 N = 0,225 lb  
1 lb = 4,45 N  
1 kg pada permukaan bumi = 2,2 lb = 9,8 N  
1 dyne =  $10^{-5}$  N =  $2,25 \times 10^{-6}$  lb
- Tekanan 1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup> =  $1,45 \times 10^{-4}$  lb/in.<sup>2</sup>  
=  $7,5 \times 10^{-3}$  mm Hg  
1 mm Hg = 133 Pa = 0,02 lb/in.<sup>2</sup>  
1 atm = 14,7 lb/in.<sup>2</sup> = 101,3 Pa = 30 in.Hg  
= 760 mm Hg  
1 bar = 105 Pa = 100 kPa
- Energi 1 J = 0,738 ft lb = 0,239 cal  
=  $9,48 \times 10^{-4}$  Btu =  $6,24 \times 10^{18}$  eV  
1 kkal = 4186 J = 3,968 Btu  
1 kal = 4,186 J =  $3,97 \times 10^{-3}$  Btu = 3,09 ft lb  
1 ft lb = 1,36 J =  $1,29 \times 10^{-3}$  Btu  
1 eV =  $1,60 \times 10^{-19}$  J  
1 kWh =  $3,6 \times 10^6$  J  
1 erg =  $10^{-7}$  J =  $7,38 \times 10^{-6}$  ft lb
- Daya 1 W = 1 J/s = 0,738 ft lb/s  
=  $1,34 \times 10^{-3}$  hp = 3,41 Btu/h  
1 ft lb/s = 1,36 W =  $1,82 \times 10^{-3}$  hp  
1 hp = 550 ft lb/s = 745,7 W  
= 2545 Btu/h

## DAFTAR PUSTAKA

- Beise, Arthur. 1990. *Konsep Fisika Modern*. Edisi keempat (terjemahan). Jakarta : Erlangga.
- Poon B. Sc., Danny, Dip. Ed. 1996. *Living Physics, MC Problems For HKCEE*. Hongkong: Goodman Publisher.
- Halliday, David. Resnick, Robert. 1996. *Fisika*. Jilid 1 &2 (terjemahan). Edisi ketiga. Jakarta: Erlangga.
- Departemen Pendidikan Nasional. 1989 - 2005. *Soal-soal UMPTN dan SPMB Fisika*. Jakarta.
- Departemen Pendidikan Nasional. 2003. *Silabus Kurikulum Berbasis Kompetensi Sekolah Menengah Atas dan Madrasah Aliyah Untuk Mata Pelajaran: Fisika*. Departemen Pendidikan Nasional. Jakarta.
- J. Bueche, Frederick. Ph. D. 1992. *Seri Buku Schaum, Teori dan Soal-soal Fisika*. Edisi Ketujuh (terjemahan). Jakarta: Erlangga.
- Giancoli, Douglas C. 2001. *Fisika Giancoli*. Jilid... (terjemahan). Edisi Kelima. Jakarta: Erlangga.
- Glencoe. 1999. *Glencoe PHYSICS, Priciples and Problems*. New York: Mc. Graw-Hill Companies.
- Marcelo, Alonso. Edward, J. Finn. 1994. *Dasar-dasar Fisika Universitas*. Jilid... (terjemahan). Edisi Kedua. Jakarta: Erlangga.
- Young, Hugh, D. Anf Freedman, Roger, A. 2004. *Sears and Zemansky's : University Physics*. San Fransisco: Pearson Education, Inc.
- J. , Keith. 2001. *Physics for You*. United Kingdom : Nelson Thornes Limited.
- L, Peter. 2000. *Jendela IPTEK, Gaya dan Gerak*. Jakarta : Balai Pustaka.

## Kunci Fisika SMA Kelas XII

### Evaluasi Bab 1

- |      |      |
|------|------|
| 1. E | 5. B |
| 3. B | 7. E |

### Evaluasi Bab 2

- |      |       |       |
|------|-------|-------|
| 1. B | 7. E  | 13. C |
| 3. B | 9. D  | 15. C |
| 5. C | 11. C | 17. A |

### Evaluasi Bab 3

- |      |       |       |
|------|-------|-------|
| 1. C | 9. B  | 15. E |
| 5. B | 11. E |       |
| 7. C | 13. B |       |

### Evaluasi Bab 4

- |      |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|
| 1. B | 7. D  | 13. B | 19. A |
| 3. C | 9. D  | 15. D | 20. C |
| 5. C | 11. E | 17. E |       |

### Evaluasi Bab 5

- |      |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|
| 1. E | 7. B  | 13. A | 19. B |
| 3. E | 9. A  | 15. D |       |
| 5. D | 11. C | 17. A |       |

### Evaluasi Bab 6

- |      |       |
|------|-------|
| 1. E | 11. B |
| 5. C | 13. C |
| 9. C | 15. C |

### Evaluasi Bab 7

- |      |       |       |
|------|-------|-------|
| 1. E | 7. D  | 13. A |
| 3. A | 9. C  | 15. B |
| 5. B | 11. C |       |

### Evaluasi Bab 8

- |      |       |       |
|------|-------|-------|
| 1. E | 7. D  | 13. A |
| 3. B | 9. D  | 15. D |
| 5. E | 11. A |       |

### Evaluasi Bab 9

- |      |      |
|------|------|
| 1. A | 5. C |
| 3. B | 7. C |

### Evaluasi Bab 10

- |      |      |      |
|------|------|------|
| 1. D | 5. E | 9. A |
| 3. B | 7. C |      |



**INDEKS FISIKA KELAS XII****A**

Afinitas elektron, 127  
Arus bolak-balik, 98, 102  
Atom, 120, 121, 122

**B**

Bilangan kuantum, 126  
Bola konduktor, 62, 63

**C**

Celah ganda, 36  
Celah tunggal, 41

**D**

Dawai, 19  
Defek massa, 142  
Difraksi, 42  
Dilatasi waktu, 136

**E**

Efek Doppler, 28  
Efisiensi, 100  
Energi ikat inti, 142  
Energi ionisasi, 127  
Energi potensial listrik, 59  
Energi relatif, 137

**F**

Fasor, 105  
Fluks Magnetik, 93  
Frekuensi, 3

**G**

Garis-garis medan listrik, 62  
Gaya Coulomb, 52  
Gaya Lorentz, 82  
Gelombang berjalan, 5  
Gelombang stasioner, 9  
Generator, 96

**H**

Hukum Faraday, 92  
Hukum Gauss, 62  
Hukum Lenz, 92  
Hukum Melde, 11

**I**

Impedansi, 105  
Induksi diri, 98  
Induksi magnet, 78  
Induktor, 98  
Intensitas bunyi, 24  
Interferensi, 36

**K**

Kapasitas kapasitor, 68  
Kapasitor, 68, 103

Kapasitor paralel, 70  
Kapasitor seri, 70  
Kawat berarus sejajar, 83  
Kecepatan relatif, 134  
Kekekalan massa-energi, 146  
Kestabilan inti, 144  
Kisi difraksi, 43  
Konstruksi panjang, 135  
Kuat medan listrik, 55

**L**

Lapisan tipis, 39

**M**

Massa relatif, 137  
Medan listrik, 55  
Model atom roti kismis, 120  
Model atom Rutherford, 121  
Muatan bergerak, 84

**N**

Nilai efektif, 102

**P**

Panjang gelombang, 34  
Pelayangan, 28, 30  
Peluruhan inti, 145  
Penghantar bergerak, 93  
Percobaan Michelson-Morley, 133  
Pergeseran Wien, 113  
Periode, 3  
Pipa organa terbuka, 20  
Pipa organa tertutup, 22  
Pola gelombang, 19  
Polarisasi, 45  
Postulat Einstein, 134  
Potensial listrik, 59

**R**

Radiasi, 112  
Reaksi inti, 146  
Relativitas Newton, 132  
Resistor, 102  
Resonansi, 105  
RLC Seri, 104

**S**

Solenoida, 80  
Spektrum atom hidrogen, 123

**T**

Taraf intensitas, 24  
Teori Kuantum Planck, 114  
Tinggi nada, 19  
Tingkat energi, 121  
Transformator, 99



Diunduh dari [BSE.Mahoni.com](http://BSE.Mahoni.com)

ISBN 978-979-068-166-8 (No. Jilid Lengkap)

ISBN 978-979-068-173-6

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BNSP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2007 tanggal 25 Juli 2007 Tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran Yang Memenuhi Syarat Kelayakan Untuk Digunakan Dalam Proses Pembelajaran.

**Harga Eceran Tertinggi (HET) Rp8.551,-**