

# Listrik - Magnet

Drs. Mulyatno, M.Si.



## PENDAHULUAN

---

Pada modul terakhir BMP Fisika Umum I telah kita pelajari sifat listrik dari muatan yang diam (statis). Bidang bahasannya dikenal sebagai *elektrostatika*. Pada modul ini akan kita lanjutkan dengan mempelajari sifat dari muatan yang bergerak, dan bidang bahasannya dikenal sebagai *elektrodinamika*. Dalam elektrodinamika kita akan mengenal besaran-besaran listrik seperti *arus listrik*, *hambatan listrik*, *energi listrik*, dan sebagainya, dan juga akan kita pelajari hukum-hukum alam yang berlaku dalam elektrodinamika seperti *hukum Ohm* dan *hukum Kirchhoff*.

Dalam lingkup elektrodinamika kita juga akan mempelajari gejala kemagnetan yang berkaitan erat dengan arus listrik. Gejala ini akan kita pelajari dalam bidang bahasan elektromagnetika, di mana di dalam pembahasannya akan kita kenal besaran-besaran seperti *medan magnet*, *gaya elektromagnet*, *induksi elektromagnet*, dan sebagainya, dan hukum-hukum alam yang berlaku di dalamnya seperti *hukum Biot-Savart*, *hukum Faraday*, *hukum Lenz*, dan sebagainya. Dalam bidang bahasan ini pula prinsip dasar terjadinya arus bolak-balik.

## KEGIATAN BELAJAR 1

## Elektrodinamika

Seperi telah disebutkan di muka, bahwa elektrodinamika mempelajari sifat listrik dari muatan yang bergerak (dinamis). Gerakan muatan tersebut menyebabkan adanya arus listrik. Muatan yang bergerak tersebut dapat berupa elektron-elektron atau ion-ion, sehingga arus listrik dapat berupa arus elektron atau arus ion. Pada Modul 6 BMP Fisika Umum I telah kita pelajari bahwa ion adalah atom yang bermuatan listrik akibat kelebihan atau kekurangan elektron di dalamnya. Di dalam bahan logam elektron-elektron bebas bergerak, sehingga di dalam bahan logam arus listrik merupakan arus elektron. Pada larutan elektrolit, yaitu larutan asam, basa dan garam, yang bebas bergerak adalah ion-ionnya, sehingga arus listrik pada larutan elektrolit merupakan arus ion.

Muatan listrik dapat bergerak karena adanya gaya listrik sebagai gaya penggeraknya (*driving force*). Dari yang telah kita pelajari pada BMP Fisika Umum I, gaya listrik dapat timbul pada sebuah muatan jika muatan tersebut ditempatkan di dalam medan listrik. Jika sebuah muatan  $q$  ditempatkan di dalam medan listrik yang kuat medannya  $E$ , maka muatan tersebut akan mendapat gaya listrik sebesar

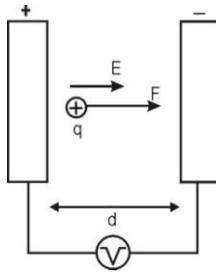
$$F = qE$$

dan jika medan listrik berasal dari dua plat kapasitor yang berjarak  $d$  (Gambar 1.1), maka kuat medannya dapat dinyatakan sebagai

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

sehingga gaya listriknya dapat dinyatakan dengan

$$F = \frac{qV}{d}$$



Gambar 1.1.  
Sebuah Muatan di dalam Medan Listrik

Selama gaya listrik bekerja pada muatan bebas maka muatan akan terus bergerak, sehingga menimbulkan arus listrik.

### A. ARUS LISTRIK DAN RAPAT ARUS

Sebagai besaran fisika, *arus listrik* didefinisikan sebagai *besarnya muatan yang mengalir persatuan waktu*. Untuk arus total definisi ini dapat dinyatakan secara matematis dengan persamaan

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1.1)$$

dengan  $I$  menyatakan arus total dan  $\Delta Q$  menyatakan jumlah muatan total yang mengalir dalam selang waktu  $\Delta t$ .

Untuk arus sesaat, definisi arus listrik secara matematis dinyatakan dalam bentuk diferensial

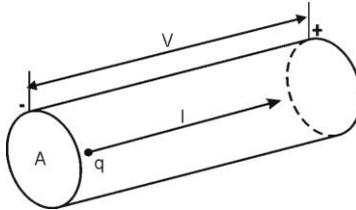
$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1.2)$$

dengan  $i$  menyatakan arus sesaat dan  $dq$  menyatakan elemen muatan yang mengalir dalam selang waktu  $dt$ .

Selain arus listrik didefinisikan pula suatu besaran yang berhubungan dengan arus yaitu *rapat arus*, yaitu *besarnya arus yang melalui satu satuan luas penampang*. Secara matematis rapat arus dinyatakan dengan persamaan

$$J = \frac{I}{A} \quad (1.3)$$

dengan  $J$  menyatakan rapat arus dan  $A$  adalah luas penampang yang dilalui arus  $I$ .



Gambar 1.2.  
Arus listrik di dalam zat padat

Arus listrik adalah besaran skalar dengan satuannya menurut SI adalah *ampere* (A), di mana  $1A = 1C/s$ . Satuan ampere dipergunakan sebagai penghargaan terhadap Andre Ampere, seorang fisikawan Prancis yang banyak berjasa di bidang elektrodinamika.

Rapat arus adalah besaran vektor dengan arah vektor tegak lurus pada luas penampang yang dilalui arus. Arah rapat arus ini kemudian sering digambarkan dalam rangkaian listrik sebagai arah arus, meskipun sebenarnya arus listrik adalah besaran skalar. Satuan dari rapat arus menurut SI adalah  $A/m^2$ .

Berdasarkan perjanjian internasional, arah arus listrik digambarkan seperti arah medan listrik, yaitu dari kutub positif ke kutub negatif. Arah arus ini sesuai dengan arah gerak muatan positif atau berlawanan dengan arah gerak muatan negatif di dalam medan listrik. Jadi di dalam logam sebenarnya arah arus listrik berlawanan dengan arah arus elektron. Bahan-bahan yang mudah menghantarkan arus listrik disebut bahan *konduktor*, sedangkan bahan-bahan yang sukar menghantarkan arus listrik disebut bahan *isolator*.

## B. HAMBATAN LISTRIK DAN HUKUM OHM

Pada pertengahan abad ke-19, seorang fisikawan Inggris George Simon Ohm (1787-1854) mendapatkan bahwa pada bahan-bahan tertentu ternyata

besarnya arus yang mengalir pada bahan sebanding dengan beda potensial antara ujung-ujung bahan dan dapat dinyatakan dengan

$$V = IR \tag{1.4}$$

Persamaan (1.4) dikenal sebagai *hukum Ohm* dan  $R$  dikenal sebagai *hambatan listrik* pada konduktor dan  $V$  adalah beda potensial listrik di antara ujung-ujung konduktor dengan satuannya volt (V). Satuan hambatan menurut SI adalah *ohm* ( $\Omega$ ), di mana  $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$ .

Besarnya hambatan listrik dari suatu bahan ditentukan oleh jenis bahan dan ukurannya. Hambatan dari suatu konduktor yang berbentuk kawat yang panjangnya  $\ell$  dan luas penampangnya  $A$  dinyatakan dengan persamaan,

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

di mana  $\rho$  adalah *hambatan jenis* bahan yang dalam SI satuannya adalah *ohm-meter* ( $\Omega\text{m}$ ).

Tabel 1.1 menunjukkan harga hambatan jenis dari beberapa jenis bahan.

Tabel 1.1.

Harga hambatan jenis dari beberapa jenis bahan pada  $20^\circ\text{C}$ .

Bahan	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Bahan	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
<b>Konduktor</b>		<b>Semikonduktor</b>	
Perak	$1,59 \times 10^{-8}$	Karbon (grafit)	$(3-60) \times 10^{-5}$
Tembaga	$1,68 \times 10^{-8}$	Germanium	$(1-500) \times 10^{-3}$
Aluminium	$2,65 \times 10^{-8}$	Silikon	0,1- 60
Tungsten	$5,60 \times 10^{-8}$		
Besi	$9,71 \times 10^{-8}$	<b>Isolator</b>	
Platina	$10,6 \times 10^{-8}$	Gelas	$10^9 - 10^{12}$
Air Raksa	$98,0 \times 10^{-8}$	Karet keras	$10^{13} - 10^{15}$

Besarnya hambatan suatu konduktor juga tergantung temperatur dan dinyatakan dengan persamaan

$$R_T = R_0(1 + \alpha\Delta T) \tag{1.6}$$

di mana  $R_T$  adalah hambatan pada temperatur  $T$ ,  $R_0$  adalah hambatan pada temperatur awal  $T_0$ ,  $\alpha$  adalah koefisien termal, dan  $\Delta T = T - T_0$  adalah perubahan temperatur.

### Contoh 1.1

Berapa besar tegangan yang harus diberikan pada ujung-ujung suatu konduktor untuk menghasilkan arus sebesar 0,21 A jika hambatan konduktor 3000  $\Omega$  ?

*Penyelesaian:*

Kita gunakan hukum Ohm:  $V = IR = (0,21)(3000) \text{ V} = 630 \text{ V}$

### Contoh 1.2

Seekor burung bertengger pada seutas kawat listrik yang dialiri arus sebesar 2500 A. Kawat listrik mempunyai hambatan sebesar  $2,5 \times 10^{-5} \Omega$  per meternya. Kedua kaki burung terpisah sejarak 4 cm. Berapa besarnya tegangan yang dirasakan oleh burung tersebut?

*Penyelesaian:*

Panjang kawat yang menyebabkan beda potensial pada burung adalah  $d = 4 \text{ cm} = 0,04 \text{ m}$ .

Untuk kawat sepanjang  $d$  besarnya hambatan listrik  $R = 0,04 \times 2,5 \times 10^{-5} \Omega = 10^{-6} \Omega$

Besarnya tegangan yang dirasakan oleh burung

$$V = IR = (2500 \times 10^{-6}) \text{ V} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ V} = 2,5 \text{ mV}$$

Ternyata tegangan yang dirasakan burung sangat kecil meskipun kawat dialiri arus yang sangat besar.

### Contoh 1.3

Sebuah kawat dialiri arus 1A. Berapa banyakkah elektron yang mengalir pada kawat tersebut, jika diketahui muatan elektron  $q_e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$  ?

*Penyelesaian:*

Misalkan jumlah elektron yang mengalir per detiknya adalah  $N$ , maka dapat kita tuliskan

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

Untuk  $\Delta t = 1 \text{ s}$  dan  $I = 1 \text{ A}$  maka  $\Delta Q = 1 \text{ C}$ , sehingga kita dapatkan

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

atau

$$N = \frac{1 \text{ C}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 6,25 \times 10^{17} \text{ elektron}$$

### Contoh 1.4

Sebuah kawat alumunium panjangnya 10 m dan diameternya 2 mm dipergunakan pada suatu rangkaian listrik. Jika kawat tersebut akan diganti dengan tembaga yang diameternya 2,5 mm, berapakah panjang kawat tembaga yang diperlukan agar hambatannya tetap?

*Penyelesaian:*

Misalkan hambatan kawat alumunium kita nyatakan dengan

$$R_1 = \rho_1 \frac{\ell_1}{A_1}$$

dan hambatan kawat tembaga kita nyatakan dengan

$$R_2 = \rho_2 \frac{\ell_2}{A_2}$$

Untuk mendapatkan hambatan yang sama maka  $R_1 = R_2$

$$\rho_1 \frac{\ell_1}{A_1} = \rho_2 \frac{\ell_2}{A_2} \Rightarrow \ell_2 = \frac{\rho_1 \ell_1 A_2}{\rho_2 A_1}$$

Dari Tabel 1.1 kita dapatkan

$$\rho_1 = \rho_{Al} = 2,65 \times 10^{-8} \Omega \text{m}, \quad \rho_2 = \rho_{Cu} = 1,68 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$$

dan dari soal diketahui

$$\ell_1 = 10 \text{ m}, A_1 = 2 \text{ mm} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}, A_2 = 2,5 \text{ mm} = 2,5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

sehingga kita dapatkan

$$\ell_2 = \frac{(2,65 \times 10^{-8})(10)(2,5 \times 10^{-3})}{(1,68 \times 10^{-8})(2 \times 10^{-3})} \text{ m} = 19,72 \text{ m}$$

Jadi untuk mendapatkan hambatan kawat yang sama dengan 10 m kawat aluminium diperlukan 19,72 m kawat tembaga.

### Contoh 1.5

Sebuah lampu mempunyai hambatan sebesar  $12 \Omega$  pada saat padam, dan  $140 \Omega$  pada saat menyala. Jika pada saat padam temperaturnya  $20^\circ\text{C}$  dan diketahui  $\alpha = 0,006 (\text{C}^\circ)^{-1}$ , berapakah temperaturnya pada saat menyala?

*Penyelesaian:*

Kita pergunakan persamaan,

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

atau

$$\Delta T = \frac{\frac{R_T}{R_0} - 1}{\alpha} \text{C} = \frac{\frac{140}{12} - 1}{0,006} \text{C} = 1777,78 \text{ }^\circ\text{C}$$

Karena kita ketahui bahwa  $\Delta T = T - T_0$  maka kita dapatkan

$$T = T_0 + \Delta T = 20^\circ\text{C} + 1777,78^\circ\text{C} = 1797,78^\circ\text{C}$$

## C. ENERGI DAN DAYA LISTRIK

Pada BMP Fisika Umum I telah kita pelajari bahwa besarnya energi listrik yang dibawa oleh muatan sebesar  $Q$  melalui beda potensial listrik sebesar  $V$  adalah

$$E = QV \tag{1.7}$$

Persamaan (1.7) dapat kita ubah bentuknya menjadi

$$E = V \left( \frac{Q}{t} \right) t = VIt \quad (1.8)$$

Dengan menggunakan persamaan  $V = IR$ , kita dapatkan bentuk lain dari persamaan (1.8)

yaitu

$$E = I^2 R t \quad (1.9)$$

Daya listrik ( $P$ ) didefinisikan sebagai energi yang dialirkan persatuan waktu, dan dinyatakan dengan persamaan

$$P = \frac{E}{t} = VI = I^2 R \quad (1.10)$$

Satuan daya listrik menurut SI adalah watt (W), di mana  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ .

### Contoh 1.6

Berapa daya listrik sebuah bola lampu pijar yang dialiri arus sebesar 3 A dan tegangan 1,5 V?

*Penyelesaian:*

Kita gunakan persamaan (1.10):  $P = VI = (1,5)(3) \text{ W} = 4,5 \text{ W}$

### Contoh 1.7

Elemen pemanas pada sebuah oven didesain untuk menghasilkan daya sebesar 3,3 kW dengan tegangan 240 V. Berapa besar hambatan elemen tersebut?

*Penyelesaian:*

Dengan  $I = \frac{V}{R}$  persamaan (1.10) dapat diubah bentuknya menjadi

$$P = \frac{V^2}{R}$$

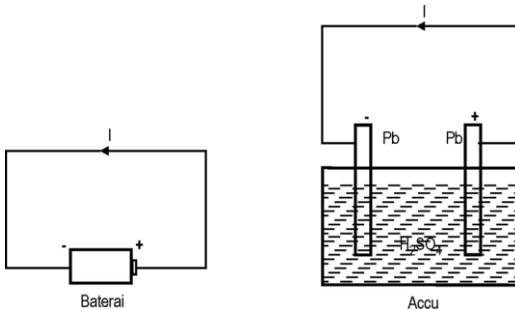
atau

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{240^2}{3,3 \times 10^3} \Omega = 17,45 \Omega$$

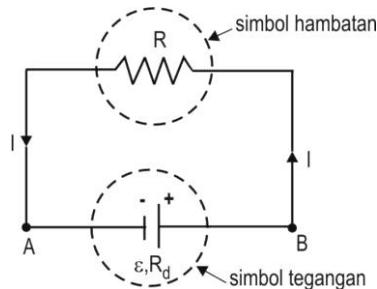
Jadi besarnya hambatan elemen adalah 17,45  $\Omega$ .

#### D. SUMBER TEGANGAN

Untuk memberikan beda potensial (tegangan) di antara dua buah titik pada sebuah konduktor diperlukan sumber tegangan. Contoh sumber tegangan yang biasa kita kenal adalah *baterai* dan *accu* seperti pada Gambar 1.3. Setiap sumber tegangan mempunyai kutub-kutub positif dan negatif. Jika kutub-kutub ini dihubungkan dengan sebuah kawat konduktor, maka akan mengalir arus listrik dari kutub positif ke kutub negatif melalui kawat konduktor. Dalam menggambarkan rangkaian listrik, sumber tegangan dan hambatan konduktor digambarkan seperti pada Gambar 1.4.



Gambar 1.3.  
Baterai dan accu sebagai sumber tegangan



Gambar 1.4.  
Gambar rangkaian listrik dengan menggunakan simbol hambatan dan tegangan

Besarnya tegangan atau beda potensial antara kutub positif dan negatif pada sebuah sumber tegangan sudah tertentu, ditentukan oleh pabrik pembuatnya. Besarnya arus listrik yang mengalir pada konduktor tergantung pada besarnya *hambatan konduktor* dan *hambatan dalam* (*hambatan internal*) dari sumber tegangan tersebut. Hubungan antara arus yang mengalir pada konduktor dengan tegangan antara ujung-ujung konduktor telah dirumuskan oleh Ohm, dan untuk rangkaian yang mengandung sumber tegangan berlaku

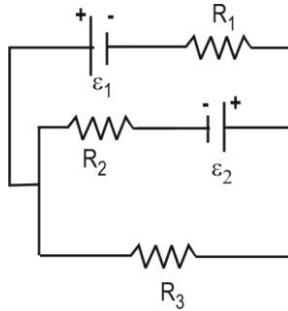
$$\varepsilon = I(R + R_d) \quad (1.11)$$

dengan  $\varepsilon$  menyatakan tegangan antara ujung-ujung konduktor, yang sama dengan tegangan sumber dan  $I$  adalah arus yang mengalir pada konduktor, sedangkan  $R$  adalah hambatan konduktor, dan  $R_d$  adalah hambatan dalam.

## E. HUKUM KIRCHHOFF

Rangkaian listrik seperti pada Gambar 1.3 dan Gambar 1.4 dikenal sebagai rangkaian tertutup. Untuk rangkaian sederhana seperti itu mudah ditentukan besarnya arus yang mengalir pada rangkaian, tetapi untuk rangkaian yang lebih kompleks seperti pada Gambar 1.5, di mana terdapat beberapa sumber tegangan dan beberapa hambatan, tidak mudah menentukan besarnya arus yang mengalir pada rangkaian, khususnya pada percabangan-percabangannya, seperti misalnya arus yang mengalir pada hambatan  $R_2$  atau

$R_3$  pada gambar tersebut. Untuk mengatasi hal ini seorang fisikawan G.R. Kirchoff (1824-1887) pada abad ke-19 telah berhasil menemukan hukum-hukum alam yang berlaku pada rangkaian tertutup yang kemudian dikenal sebagai hukum Kirchoff, yang terdiri dari dua hukum dasar yaitu,



Gambar 1.5.  
Rangkaian tertutup

### Hukum Kirchoff I:

Pada setiap percabangan pada rangkaian tertutup, jumlah arus yang masuk ke titik percabangan sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik percabangan. Secara matematis hukum Kirchoff I dinyatakan dengan persamaan,

$$\sum I_{\text{input}} = \sum I_{\text{output}} \quad (1.12)$$

### Hukum Kirchoff II :

Jumlah tegangan yang dihasilkan oleh sumber-sumber tegangan pada rangkaian tertutup sama dengan jumlah tegangan terminal dari ujung-ujung hambatan. Secara matematis hukum Kirchoff II dinyatakan dengan persamaan,

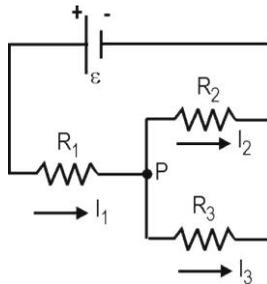
$$\sum \varepsilon - \sum IR = 0 \quad (1.13)$$

di mana  $\sum IR$  adalah jumlah tegangan-tegangan terminal antara ujung-ujung hambatan pada rangkaian tertutup.

Gambar 1.6 menunjukkan sebuah rangkaian tertutup dengan percabangan arus, di mana titik P sebagai titik percabangannya. Menurut hukum Kirchoff I berlaku

$$I_1 = I_2 + I_3 \tag{1.14}$$

di mana  $I_1$  menyatakan arus yang masuk ke titik percabangan dan  $I_2$  dan  $I_3$  adalah arus yang keluar dari titik percabangan.

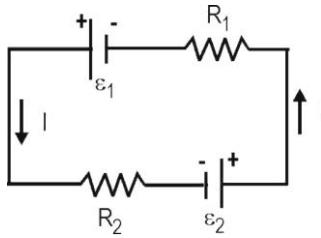


Gambar 1.6.  
Rangkaian tertutup dengan percabangan arus

Gambar 1.7 menunjukkan sebuah rangkaian tertutup dengan dua buah sumber tegangan dan dua buah hambatan. Karena tidak ada percabangan maka arus yang mengalir pada rangkaian hanya satu, yaitu  $I$ . Menurut hukum Kirchoff II berlaku

$$(\epsilon_1 + \epsilon_2) - (IR_1 + IR_2) = 0 \tag{1.15}$$

di mana  $(\epsilon_1 + \epsilon_2)$  adalah jumlah tegangan dari sumber-sumber tegangan dan  $(IR_1 + IR_2)$  adalah jumlah tegangan-tegangan terminal antara ujung-ujung hambatan.

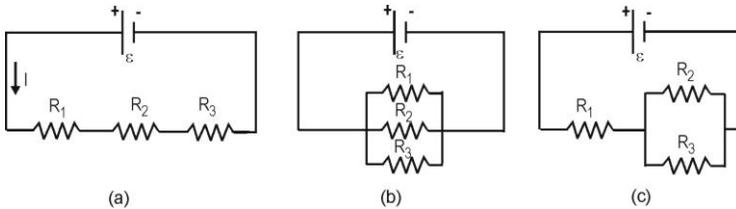


Gambar 1.7.

Rangkaian tertutup dengan dua sumber tegangan dan dua hambatan

## F. RANGKAIAN HAMBATAN

Beberapa hambatan dapat dirangkai seri atau paralel, atau kombinasi seri-paralel, seperti pada Gambar 1.8. Setiap rangkaian hambatan dapat digantikan dengan sebuah hambatan pengganti ( $R_p$ ).



Gambar 1.8.

Rangkaian hambatan (a) rangkaian seri, (b) rangkaian paralel, (c) rangkaian seri-paralel.

Untuk rangkaian seri seperti pada Gambar 1.8a, besarnya hambatan pengganti adalah

$$R_p = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1.16)$$

dan untuk rangkaian paralel seperti pada Gambar 1.8b, besarnya hambatan pengganti dapat ditentukan dari persamaan,

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (1.17)$$

atau

$$R_p = \frac{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (1.18)$$

Untuk rangkaian seri-paralel seperti pada Gambar 1.8c, hambatan penggantinya ditentukan dengan terlebih dahulu menentukan hambatan pengganti untuk rangkaian paralel  $R_2$  dan  $R_3$  yaitu

$$\frac{1}{R'_p} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (1.19)$$

atau

$$R'_p = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \quad (1.20)$$

dan kemudian hambatan pengganti totalnya adalah

$$R_p = R_1 + R'_p \quad (1.21)$$

Secara umum besarnya hambatan pengganti dari  $n$  buah hambatan yang disusun seri adalah,

$$R_p = \sum_{i=1}^n R_i \quad (1.22)$$

dan besarnya hambatan pengganti dari  $n$  buah hambatan yang disusun paralel ditentukan dari persamaan

$$\frac{1}{R_p} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad (1.23)$$

Untuk rangkaian seri-paralel hambatan penggantinya dicari dengan menggunakan kombinasi persamaan (1.22) dan (1.23).

### Contoh 1.8

Berapa besar hambatan pengganti dari 5 buah hambatan yang masing-masing besarnya  $3 \Omega$  jika:

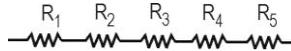
1. kelimanya dirangkai seri;
2. kelimanya dirangkai paralel;

3. tiga hambatan dirangkai paralel kemudian dirangkai seri dengan dua hambatan lainnya

*Penyelesaian:*

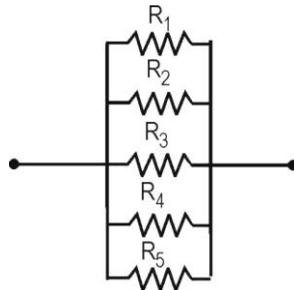
1. Rangkaian seri

$$\begin{aligned} R_p &= R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \\ &= (5)(3 \Omega) \\ &= 15 \Omega \end{aligned}$$



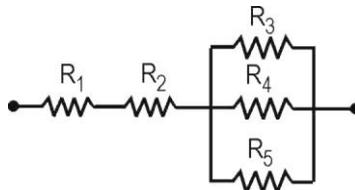
- b) Rangkaian paralel

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_p} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \\ &= (5) \left( \frac{1}{3 \Omega} \right) \\ R_p &= \frac{3}{5} \Omega = 0,6 \Omega \end{aligned}$$



- c) Rangkaian seri-paralel

$$\begin{aligned} \frac{1}{R'_p} &= \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \\ &= (3) \left( \frac{1}{3 \Omega} \right) \end{aligned}$$

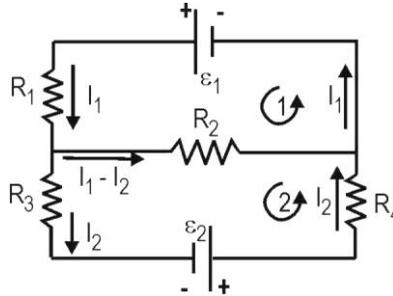


$$R'_p = \frac{3}{3} \Omega = 1 \Omega \implies R_p = R_1 + R_2 + R'_p = (3 + 3 + 1) \Omega = 7 \Omega$$

## G. PENERAPAN HUKUM KIRCHHOFF

Hukum Kirchhoff diterapkan dalam persoalan rangkaian listrik tertutup, khususnya untuk menentukan besarnya arus-arus yang mengalir pada rangkaian tersebut. Sebagai contoh kita ambil rangkaian tertutup seperti pada

Gambar 1.9. Persoalannya adalah bagaimana kita menentukan besarnya arus yang mengalir melalui hambatan-hambatan  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  dan  $R_4$ . Untuk menyelesaikan persoalan ini dapat kita ambil langkah-langkah sebagai berikut:



Gambar 1.9.

Rangkaian tertutup dengan dua sumber tegangan dan empat hambatan

1. Pandanglah rangkaian tertutup tersebut sebagai dua buah rangkaian tertutup, yaitu rangkaian 1 dan 2 seperti pada gambar.
2. Tentukan arah loop yang sama pada kedua rangkaian tertutup tersebut dan kemudian kita misalkan tanda aljabar untuk  $I$  dan  $\epsilon$  sebagai berikut:
  - a. Jika arus  $I$  searah dengan arah loop kita beri tanda (+), dan jika arahnya berlawanan dengan arah loop kita beri tanda (-).
  - b. Jika arah loop pada sumber tegangan dari kutub (-) ke (+) maka  $\epsilon$  kita beri tanda (+), dan jika arah sebaliknya kita beri tanda (-).
3. Tuliskan persamaan hukum Kirchhoff sesuai untuk setiap loop sesuai dengan arah loop.

Untuk loop 1 dapat kita tuliskan

$$\sum \epsilon - \sum IR = 0$$

$$\epsilon_1 - (I_1 R_1 + (I_1 - I_2) R_2) = 0 \quad (1)$$

dan untuk loop 2 dapat kita tuliskan

$$\sum \epsilon - \sum IR = 0$$

$$\epsilon_2 - (I_2 R_4 - (I_1 - I_2) R_2 + I_2 R_3) = 0 \quad (2)$$

4. Selesaikan sistem persamaan (1) dan (2) untuk mendapatkan  $I_1$ ,  $I_2$  dan  $I_3 = I_1 - I_2$  jika  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  dan  $R_4$  diketahui besarnya.
5. Apabila dari hasil penyelesaian tersebut ternyata didapatkan harga arus negatif maka sebenarnya arah arusnya berlawanan dengan arah yang dimisalkan.

### Contoh 1.9

Untuk rangkaian tertutup seperti pada Gambar 1.9 diketahui  $\varepsilon_1 = 6 \text{ V}$ ,  $\varepsilon_2 = 9 \text{ V}$ ,  $R_1 = R_2 = 3 \ \Omega$ ,  $R_3 = 6 \ \Omega$ ,  $R_4 = 4 \ \Omega$ . Tentukan besarnya  $I_1$ ,  $I_2$  dan  $I_3 = I_1 - I_2$ .

*Penyelesaian:*

Kita tuliskan kembali persamaan hukum Kirchhoff untuk rangkaian tersebut

$$\varepsilon_1 - (I_1 R_1 + (I_1 - I_2) R_2) = 0 \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 - (I_2 R_4 - (I_1 - I_2) R_2 + I_2 R_3) = 0 \quad (2)$$

atau kita ubah bentuknya menjadi

$$I_1 (R_1 + R_2) - I_2 R_2 = \varepsilon_1 \quad (3)$$

$$-I_1 R_2 + I_2 (R_2 - R_3 + R_4) = \varepsilon_2 \quad (4)$$

kemudian kita masukkan harga-harga  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  dan  $R_4$ , ke dalam persamaan (3) dan (4)

$$6 I_1 - 3 I_2 = 6 \quad (5)$$

$$-3 I_1 + I_2 = 9 \quad (6)$$

Selanjutnya penyelesaian persamaan (5) dan (6) adalah

$$(5) \times 1 \Rightarrow 6 I_1 - 3 I_2 = 6 \quad (5)$$

$$(6) \times 2 \Rightarrow -6 I_1 + 2 I_2 = 18 \quad (6)$$

----- +

$$- I_2 = 24$$

$$I_2 = -24 \text{ A} \quad (7)$$

Substitusi persamaan (7) ke dalam persamaan (6) menghasilkan

$$-3 I_1 - 24 = 9$$

$$-3 I_1 = 33$$

$$I_1 = -11 \text{ A} \quad (8)$$

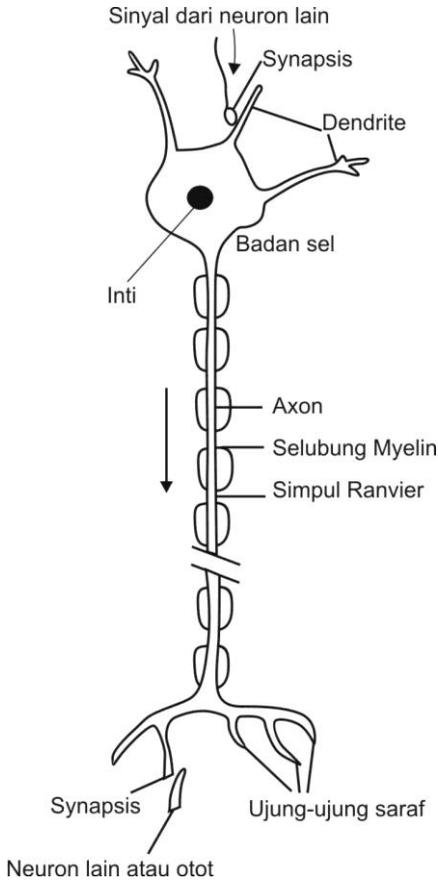
Selanjutnya kita tentukan  $I_3$

$$I_3 = I_1 - I_2 = -11 - (-24) = 13 \text{ A}$$

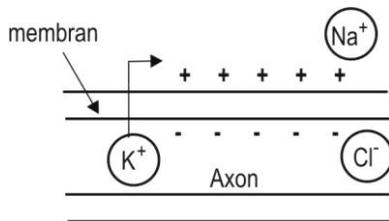
Jadi kita dapatkan  $I_1 = 11 \text{ A}$ ,  $I_2 = 24 \text{ A}$ , dan  $I_3 = 13 \text{ A}$  dengan arah  $I_1$  dan  $I_2$  berlawanan dengan arah arus pada gambar, dan arah  $I_3$  sesuai dengan arah arus pada gambar.

## H. LISTRIK PADA SISTEM SYARAF

Sistem syaraf kita merupakan suatu jaringan neuron, (sel-sel syaraf) yang sangat kompleks. Neuron mempunyai bentuk yang unik dan sangat berbeda dengan bentuk sel hidup lainnya. Gambar 1.10 merepresentasikan sebuah neuron. Setiap neuron mempunyai tiga bagian penting untuk menyalurkan sinyal listrik yaitu *synapsis* (simpul syaraf), *dendrite* dan *axon*. *Synapsis* berfungsi sebagai pemancar sinyal listrik (*transmitter*), *dendrite* sebagai penangkap sinyal (*receiver*) dan *axon* sebagai medium perambat sinyal. *Axon* diselubungi oleh suatu membran di mana kedua permukaannya (permukaan luar dan dalam) mengandung muatan yang berlawanan jenis yang disebabkan oleh adanya kandungan ion-ion pada cairan di luar dan di dalam sel. Jenis ion terbanyak yang terkandung di dalam cairan dalam dan luar sel adalah ion  $K^+$ ,  $Na^+$  dan  $Cl^-$ . Perbandingan komposisi ion-ion tersebut adalah seperti pada Tabel 1.2, sedangkan Gambar 1.11 merepresentasikan penyebaran muatan pada permukaan membran.



Gambar 1.10.  
Skema sebuah neuron



Gambar 1.11.  
Penyebaran ion di sekitar membran

Tabel 1.2.  
Konsentrasi ion-ion di dalam dan di luar suatu *axon*.

Ion	Konsentrasi di dalam <i>Axon</i> (mol/m <sup>3</sup> )	Konsentrasi di luar <i>Axon</i> (mol/m <sup>3</sup> )
K <sup>+</sup>	140	5
Na <sup>+</sup>	15	140
Cl <sup>-</sup>	9	125

Dalam keadaan tanpa sinyal listrik (*resting state*) muatan-muatan tersebar merata di sepanjang permukaan *axon*, di mana muatan positif tersebar di permukaan luar membran dan muatan negatif tersebar di permukaan dalam membran. Dalam keadaan ini bagian dalam *axon* menyimpan potensial sekitar -60 s/d -90 mV tergantung pada jenis organnya. Pada waktu *axon* mendapat sinyal listrik terjadi difusi ion dari permukaan luar ke permukaan dalam membran, sehingga terjadi lonjakan potensial di bagian dalam *axon* hingga mencapai sekitar +40 mV. Kejadian ini berlangsung sangat cepat, dalam hitungan milidetik. Lonjakan potensial ini dikenal sebagai *potensial aksi*, yang merambat dari bagian pangkal ke ujung *axon*. Perambatan potensial aksi ini menyebabkan terjadinya depolarisasi pada permukaan-permukaan membran, sehingga permukaan luarnya menjadi bermuatan negatif dan permukaan dalamnya bermuatan positif. Setelah perambatan sinyal sudah mencapai ujung *axon*, di mana seluruh permukaan *axon* sudah terdepolarisasi, maka *axon* akan kembali ke keadaan semula dengan melakukan repolarisasi, di mana permukaan luar membran menjadi bermuatan positif kembali dan permukaan dalamnya bermuatan negatif.

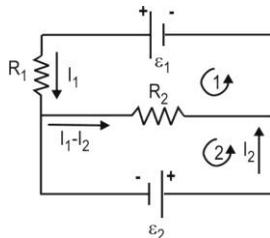
Potensial aksi menyerupai sinyal digital (*sinyal on-off*) dengan memberikan respon *menyala* jika ada sinyal dan *mati* jika tidak ada sinyal. Kecepatan perambatan potensial aksi tergantung pada diameter *axon* dan jumlah kandungan *mylin* (struktur protein lipid) yang menyelubungi *axon*. Dengan kandungan *mylin* yang rendah kecepatan potensial aksi bisa sangat rendah, dan yang paling rendah adalah sekitar 0,5 m/s. Sebaliknya dengan kandungan *mylin* yang tinggi kecepatan perambatannya bisa sangat tinggi dan dapat mencapai 130 m/s. Sesungguhnya perambatan sinyal listrik pada sistem syaraf melibatkan proses elektrokimia yang sangat kompleks, dan pada saat ini belum dapat diketahui secara lengkap.



## LATIHAN

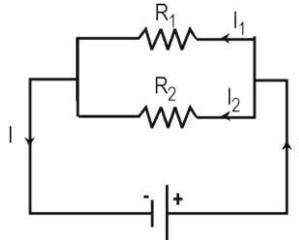
Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Dua buah hambatan  $R_1 = 12 \Omega$  dan  $R_2 = 18 \Omega$  dirangkai secara paralel, kemudian ujung-ujung rangkaian dihubungkan dengan baterai 12 V.
  - a) berapa besar arus yang mengalir pada  $R_1$  dan  $R_2$ ?
  - b) jika rangkaian hambatan ini diganti dengan sebuah hambatan pengganti, berapa besarnya hambatan penggantinya? Berapa besar arus yang mengalir pada hambatan pengganti?
- 2) Berapa besar hambatan seutas kawat tungsten yang panjangnya 400 m dan diameternya 1,2 mm?
- 3) Kemampuan hidup suatu accu dinyatakan dalam satuan ampere-jam (Ah). Sebuah accu yang mempunyai tegangan sumber 12 V mempunyai kemampuan hidup 60 Ah, artinya untuk pemakaian arus 60 A accu dapat bertahan selama 1 jam, untuk pemakaian arus sebesar 1 A accu dapat bertahan selama 60 jam, untuk pemakaian arus sebesar 20 A accu dapat bertahan selama 3 jam, dan seterusnya. Berapa lama accu dapat menyalakan sebuah lampu yang dayanya 50 watt?
- 4) Berapa banyak lampu 100 watt yang bisa dipasang paralel sehingga jika diberi tegangan 120 V tidak menyebabkan sekering 10 A putus?
- 5) Untuk rangkaian listrik seperti pada gambar, tentukan besarnya arus yang mengalir pada hambatan  $R_1$  dan  $R_2$ .



*Petunjuk Jawaban Latihan*

1. a) Gambar rangkaian



Dengan hukum Kirchoff kita dapatkan

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = \varepsilon$$

Jika R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> dan ε diketahui, maka I<sub>1</sub> dan I<sub>2</sub> dapat dicari.

- b) Penggunaan persamaan (1.23)

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

- 2) Penggunaan persamaan (1.5)

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

dengan harga ρ tungsten dapat dilihat pada Tabel 1.1 dan luas penampang  $A = \pi r^2$ .

- 3) Daya lampu dapat dinyatakan dengan persamaan

$$P = VI$$

sehingga

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

Kemudian kemampuan accu dapat ditentukan dengan persamaan

$$t = \frac{60 Ah}{I}$$

- 4) Misalkan hambatan dari masing-masing lampu adalah  $R$ , maka daya dari masing-masing lampu adalah

$$P = VI = V \frac{V}{R} = \frac{V^2}{R} = 100 \text{ watt}$$

Jadi dapat kita tentukan besarnya  $R$ . Selanjutnya kita misalkan ada  $n$  buah lampu yang dirangkai paralel, yang mempunyai hambatan pengganti

$$\frac{1}{R_p} = \frac{n}{R} \Rightarrow R_p = \frac{R}{n}$$

Hukum Kirchhoff

$$V = I'R_p = \frac{I'R}{n}$$

dengan  $I'$  adalah arus total yang melalui sekring. Agar  $I' \leq 10$  A maka

$$\frac{nV}{R} \leq 10$$

atau

$$n \leq \frac{10R}{V}$$

5. Gunakan hukum Kirchhoff

$$\text{Loop 1 : } -I_1R_1 - (I_1 - I_2)R_2 + \varepsilon_1 = 0$$

$$\text{Loop 2 : } (I_1 - I_2)R_2 + \varepsilon_2 = 0$$

Dari dua persamaan di atas dapat ditentukan besarnya  $I_1$  dan  $I_2$



Elektrodinamika mempelajari sifat dari muatan listrik. Muatan listrik yang bergerak menimbulkan arus listrik. Pada zat padat arus listrik merupakan arus elektron, dan pada larutan elektrolit arus listrik adalah arus ion.

Arus listrik adalah besaran skalar yang menyatakan besarnya muatan yang mengalir persatuan waktu

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

Rapat arus adalah besaran vektor yang menyatakan besarnya arus yang melalui suatu luas penampang konduktor

$$J = \frac{I}{A} = \frac{\Delta Q}{A \Delta t}$$

Hubungan antara beda potensial (V) pada ujung-ujung suatu konduktor dengan arus dan hambatan listrik dinyatakan dengan hukum Ohm

$$V = IR$$

dengan hambatan R tergantung pada hambatan jenis bahan konduktor ( $\rho$ ), panjang konduktor ( $\ell$ ) dan luas penampang konduktor (A)

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

Arus listrik dapat menimbulkan energi potensial listrik yang besarnya,

$$E = I^2 R t$$

Daya listrik didefinisikan sebagai besarnya energi listrik yang dihasilkan persatuan waktu

$$P = \frac{E}{t} = I^2 R = VI$$

Pada setiap rangkaian listrik tertutup berlaku hukum Kirchoff yang menyatakan

$$\sum I_{\text{input}} = \sum I_{\text{output}}, \text{ pada setiap percabangan}$$

$$\sum V - \sum IR = 0, \text{ pada setiap rangkaian tertutup}$$

Beberapa buah hambatan dapat dirangkai secara seri, paralel, atau seri-paralel. Jika  $n$  buah hambatan dirangkai seri maka hambatan penggantinya adalah

$$R_p = \sum_{i=1}^n R_i$$

dan jika dirangkai paralel, hambatan penggantinya dicari dari persamaan

$$\frac{1}{R_p} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

Hukum Kirchoff dapat diterapkan dalam menyelesaikan masalah arus listrik pada rangkaian tertutup. Di dalam tubuh kita sistem informasi dari organ ke otak dan instruksi dari otak ke organ dilakukan oleh sistem syaraf, di mana informasi dan instruksi tersebut dikirimkan dalam bentuk sinyal listrik melalui mekanisme yang sangat kompleks.



### TES FORMATIF 1

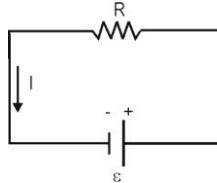
---

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Pengisian muatan pada sebuah baterai dilakukan dengan memberikan arus sebesar 3 A melalui baterai selama 6 jam. Besarnya muatan yang melalui baterai adalah ....
  - A.  $1,08 \times 10^3$  C
  - B.  $1,08 \times 10^4$  C
  - C.  $6,48 \times 10^3$  C
  - D.  $6,48 \times 10^4$  C

- 2) Sebuah baterai 12 V dihubungkan dengan sebuah hambatan seperti pada gambar. Jika arus yang mengalir pada hambatan besarnya 0,5 A maka besarnya hambatan ....

- A. 0,6  $\Omega$
- B. 2,4  $\Omega$
- C. 6  $\Omega$
- D. 24  $\Omega$



- 3) Dari soal Nomor 2, besarnya energi yang dikeluarkan baterai per menitnya adalah ....

- A. 6 J/menit
- B. 36 J/menit
- C. 60 J/menit
- D. 360 J/menit

- 4) Pada temperatur berapa tembaga akan mempunyai hambatan jenis yang sama dengan tungsten pada 20<sup>0</sup>C?

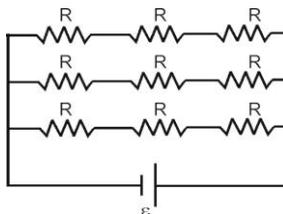
- A. -122,94 <sup>0</sup>C
- B. -82,94 <sup>0</sup>C
- C. 323,14 <sup>0</sup>C
- D. 363,14 <sup>0</sup>C

- 5) Sebuah lampu akan memberikan daya sebesar 60 W jika dihubungkan dengan sumber tegangan 120 V. Besarnya hambatan lampu adalah ....

- A. 60  $\Omega$
- B. 120  $\Omega$
- C. 240  $\Omega$
- D. 480  $\Omega$

- 6) Sembilan buah lampu, masing-masing dengan hambatan 100  $\Omega$ , dihubungkan 3 seri – 3 paralel seperti pada gambar. Besarnya hambatan pengganti dari susunan lampu tersebut adalah ....

- A. 10  $\Omega$
- B. 30  $\Omega$
- C. 100  $\Omega$
- D. 300  $\Omega$



Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 1 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 1.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali  
80 - 89% = baik  
70 - 79% = cukup  
< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan Kegiatan Belajar 2. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 1, terutama bagian yang belum dikuasai.

## KEGIATAN BELAJAR 2

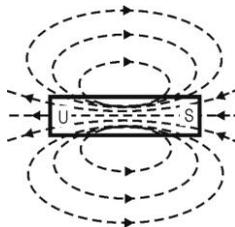
## Elektromagnetika

Gejala magnet sudah diketahui orang sejak ribuan tahun yang silam, khususnya oleh bangsa Asia Kecil. Di daerah yang dikenal sebagai Magnesia terdapat bebatuan yang mengandung sifat magnet, yaitu dapat menarik logam-logam yang berada dekat dengan bebatuan tersebut. Kata magnet sendiri berasal dari nama daerah tersebut.

Magnet yang berasal dari batuan alam dikenal sebagai magnet permanen. Pada abad ke-19 para fisikawan menemukan adanya hubungan antara sifat kemagnetan dengan sifat kelistrikan. Dalam modul ini akan kita pelajari hubungan tersebut.

## A. MEDAN MAGNET

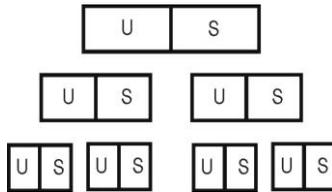
Pada bahan (material) magnetik dapat kita jumpai adanya kutub-kutub magnet yang dikenal sebagai kutub utara dan kutub selatan. Jika bahan magnetik berbentuk batang, maka separuh bagiannya menjadi kutub utara dan separuh bagian yang lainnya menjadi kutub selatan. Di sekitar bahan magnetik terdapat medan magnet yang digambarkan dengan adanya garis-garis gaya magnetik yang berawal dari kutub utara dan berakhir di kutub selatan magnet. Setiap garis gaya menunjukkan titik-titik yang kuat medan magnetnya sama besar. Gambar 1.12 merepresentasikan garis-garis gaya magnetik dari sebuah magnet batang.



Gambar 1.12.

Garis-garis gaya magnetik dari sebuah magnet batang.

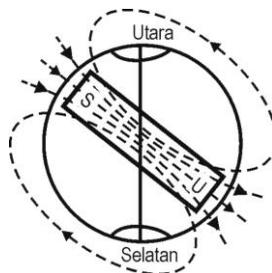
Sifat dari kutub-kutub magnet adalah kutub-kutub yang sejenis saling tolak menolak dan kutub-kutub yang tidak sejenis saling tarik menarik. Kutub-kutub magnet tidak dapat diisolasi artinya pada setiap magnet selalu ada kutub utara dan selatan. Jika setiap magnet batang kita potong-potong menjadi beberapa bagian seperti pada Gambar 1.13, maka setiap bagian magnet batang tersebut tetap sebagai magnet batang yang mempunyai kutub utara dan selatan.



Gambar 1.13.

Sifat magnet tetap ada meskipun magnet dipotong menjadi beberapa bagian

Bumi kita ini juga mengandung magnet yang menyerupai magnet batang. Posisi kutub utara magnet bumi berdekatan dengan kutub selatan bumi dan posisi kutub selatan magnet bumi berdekatan dengan kutub utara bumi. Gambar 1.14 merepresentasikan kedudukan magnet bumi.



Gambar 1.14.

Magnet bumi menyerupai magnet batang

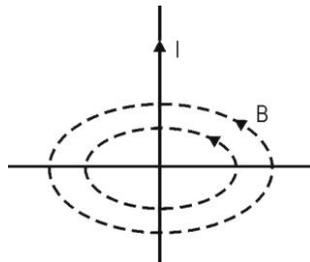
Sebuah jarum kompas dalam keadaan bebas akan mengarah ke utara-selatan, hal ini disebabkan jarum kompas terbuat dari bahan magnetik yang dalam keadaan bebas kutub utaranya mengarah ke kutub selatan magnet bumi, sedangkan kutub selatannya mengarah ke kutub utara magnet bumi.

Adanya medan magnet di sekitar bahan magnetik dapat kita amati dengan melakukan sebuah eksperimen yang sederhana. Jika kita meletakkan sebuah magnet batang di atas selembar kertas dan kemudian di sekitarnya kita taburi dengan serbuk (pasir) besi maka serbuk besi tersebut akan membentuk pola-pola garis gaya magnetik.

## B. MEDAN MAGNET DI SEKITAR ARUS LISTRIK

Adanya hubungan antara sifat listrik dan sifat magnet mula-mula diketahui dari percobaan seorang fisikawan Denmark, yaitu Hans Christian Oersted (1777-1851). Pada Tahun 1820 Oersted melakukan percobaan mendekatkan sebuah jarum kompas ke sebuah kawat berarus listrik. Ternyata jarum kompas mengalami penyimpangan arah. Dari pengamatannya ini Oersted menyimpulkan bahwa di sekitar kawat berarus listrik terdapat medan magnet (yang dapat mempengaruhi posisi jarum kompas). Pada penelitian-penelitian berikutnya dapat diketahui bentuk garis-garis gaya magnetik di sekitar kawat berarus. Jika kita menggambarkan sebuah garis gaya magnetik di sekitar kawat berarus, maka bentuk garis gaya tersebut adalah sebuah lingkaran yang berpusat di kawat. Lingkaran ini merepresentasikan titik-titik di sekitar kawat berarus yang mempunyai medan magnet yang sama besarnya. Gambar 1.15 merepresentasikan beberapa garis gaya yang berupa lingkaran-lingkaran sepusat yang dihasilkan oleh sebuah kawat berarus. Arah garis gaya magnetik, atau arah medan magnetnya, mengikuti *aturan tangan kanan*.

Pada gambar tersebut arah ibu jari tangan kanan menunjukkan arah arus, sedangkan arah genggamannya menunjukkan arah medan magnet.

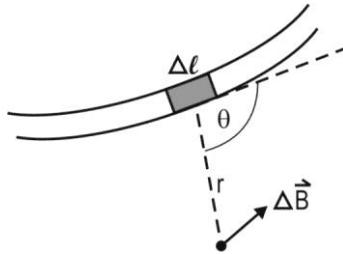


Gambar 1.15.  
Garis gaya magnet di sekitar kawat berarus

Besarnya medan magnet yang ditimbulkan oleh elemen kawat berarus yang panjangnya  $\Delta \ell$  dan dialiri arus sebesar  $I$  pada suatu titik yang berjarak  $r$  dari elemen kawat (Gambar 1.16) dinyatakan dengan persamaan

$$\Delta B = \frac{\mu_0 I \Delta \ell}{4\pi r^2} \sin \theta \quad (1.24)$$

di mana  $\Delta B$  adalah besarnya medan magnet,  $\mu_0$  dikenal sebagai permeabilitas magnetik untuk ruang hampa, dan  $\theta$  adalah sudut antara vektor jarak  $\vec{r}$  dengan vektor elemen panjang  $\Delta \vec{\ell}$ . Satuan kuat medan magnet menurut SI adalah *tesla* (T). Satuan lain yang sering dipergunakan adalah *gauss*, di mana  $1 \text{ Gauss} = 10^{-4} \text{ T}$ . Besarnya  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$ .



Gambar 1.16.  
Elemen medan magnet  $\Delta B$  yang dihasilkan elemen kawat arus  $\Delta \ell$  pada jarak  $r$

Persamaan(1.24) sering dinyatakan dalam bentuk diferensial

$$dB = \frac{\mu_0 I d\ell}{4\pi r^2} \sin \theta \quad (1.25)$$

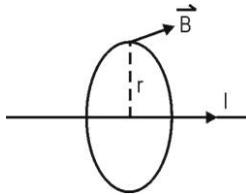
atau dalam bentuk integral

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\ell}{r^2} \sin \theta \quad (1.26)$$

Pada umumnya  $\sin \theta$  dapat dinyatakan dalam  $r$  dan  $\ell$ , dan dengan menggunakan persamaan (1.26) dapat ditentukan besarnya medan magnet di titik-titik tertentu dari kawat arus yang bentuknya tertentu. Berikut ini adalah beberapa contoh hasil perhitungan medan magnet yang dihasilkan oleh beberapa bentuk kawat arus.

1. Kuat medan magnet pada suatu titik berjarak  $r$  dari sebuah kawat arus yang panjangnya tak terhingga (Gambar 1.17)

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \tag{1.27}$$

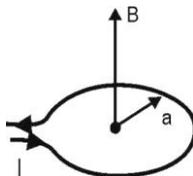


Gambar 1.17.

2. Kuat medan magnet pada titik pusat suatu kawat arus yang berbentuk cincin (Gambar 1.18)

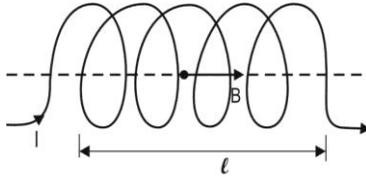
$$B = \frac{\mu_0 I}{2 a} \tag{1.28}$$

dimana  $a$  adalah jari-jari cincin arus.



Gambar 1.18.

3. Kuat medan magnet di dalam suatu kumparan arus (*solenoida*) yang panjangnya  $\ell$  dan jumlah lilitannya  $N$  (Gambar 1.19)



Gambar 1.19

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\ell} \quad (1.29a)$$

atau

$$B = \mu_0 nI \quad (1.29b)$$

dengan

$$n = \frac{N}{\ell} \quad (1.30)$$

di mana  $n$  menyatakan banyaknya lilitan persatuan panjang.

Untuk *solenoida* yang cukup panjang dengan diameter *solenoida* cukup kecil, medan magnet di setiap titik di dalam *solenoida* sama besarnya (homogen).

### Contoh 1.10

Berapa besar arus yang harus dialirkan pada sebuah kawat lurus yang sangat panjang agar dihasilkan medan magnet sebesar medan magnet bumi, yaitu sebesar  $0,55 \times 10^{-4}$  T, pada titik yang berjarak 30 cm dari kawat?

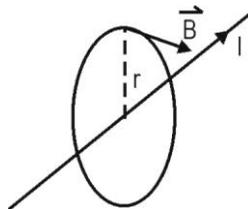
*Penyelesaian:*

Kita pergunakan persamaan (1.27)

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

atau

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



Dengan  $B = 0,55 \times 10^{-4} \text{ T}$ ,  $r = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$  dan  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$  kita dapatkan

$$I = \frac{(2\pi)(0,3)(0,55 \times 10^{-4})}{4\pi \times 10^{-7}} \text{ A} = 82,5 \text{ A}$$

Jadi pada kawat harus dialirkan arus sebesar 82,5 A.

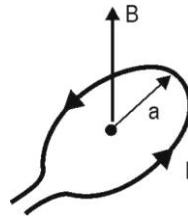
**Contoh 1.11**

Sebuah cincin arus dengan jari-jari 20 cm dialiri arus sebesar 10 A. Tentukan besarnya medan magnet pada pusat cincin.

*Penyelesaian:*

Kita gunakan persamaan (1.28)

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



Dengan  $a = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$  kita dapatkan

$$B = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(10)}{(2)(0,2)} \text{ T} \approx 3,14 \times 10^{-5} \text{ T}$$

**Contoh 1.12**

Sebuah *solenoida* yang panjangnya 30 cm mempunyai 1000 lilitan. Berapa besar arus listrik yang harus dialirkan pada *solenoida* agar dihasilkan medan magnet sebesar 0,25 T di dalam *solenoida*?

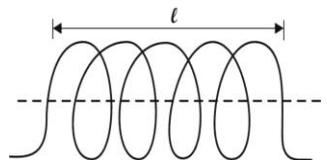
*Penyelesaian:*

Kita gunakan persamaan (1.29)

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

atau

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



Dengan  $B = 0,25 \text{ T}$ ;  $\ell = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$ ;  $N = 1000$  lilitan dan  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$  kita dapatkan

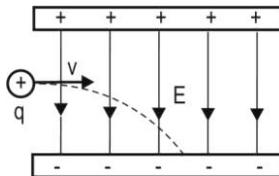
$$I = \frac{(0,25)(0,3)}{(4\pi \times 10^{-7})(1000)} \text{ A} \approx 59,7 \text{ A}$$

### C. GERAK MUATAN DI DALAM MEDAN LISTRIK DAN MEDAN MAGNET

Jika sebuah muatan berada di dalam medan listrik, maka muatan tersebut akan mendapatkan gaya listrik. Andaikan muatan tersebut adalah muatan positif yang besarnya  $q$  dan besar medan listriknya adalah  $E$ , maka besarnya gaya listrik pada muatan adalah

$$F_e = qE \quad (1.31)$$

Jika muatan  $q$  dilewatkan di antara dua plat kapasitor yang kuat medannya  $E$  seperti pada Gambar 1.20, maka gaya listrik yang timbul pada muatan  $q$  menyebabkan muatan tersebut akan membelok ke arah plat kapasitor yang bermuatan negatif seperti ditunjukkan pada Gambar 1.20.



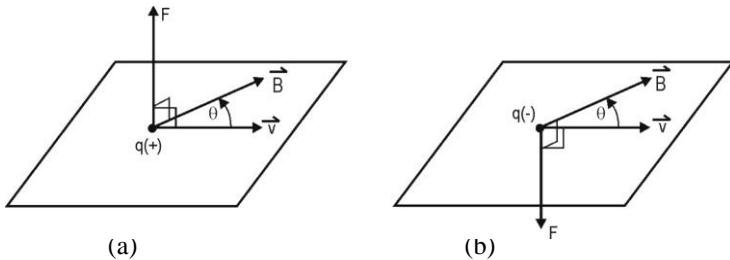
Gambar 1.20.  
Gerak muatan di dalam medan listrik

Seperti halnya di dalam medan listrik, di dalam medan magnet pun muatan akan mendapatkan gaya magnetik. Jika gaya listrik juga dapat timbul pada muatan yang diam, maka gaya magnetik hanya timbul pada muatan yang bergerak di dalam medan magnet. Gaya magnetik pada muatan yang bergerak di dalam medan magnet dikenal sebagai *gaya Lorentz*, yang mempunyai sifat yang agak berbeda dengan gaya listrik. Gaya Lorentz merupakan produk vektor, yaitu merupakan hasil perkalian silang (*cross*

product) antara vektor kecepatan ( $\vec{v}$ ) dan vektor medan magnet ( $\vec{B}$ ). Secara matematik gaya Lorentz dinyatakan dengan persamaan

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \tag{1.32}$$

dengan arah  $\vec{F}$  tegak lurus arah  $\vec{v}$  dan  $\vec{B}$  mengikuti aturan tangan kanan seperti pada Gambar 1.21. Aturan tangan kanan berlaku untuk muatan positif, untuk muatan negatif arah gaya Lorentz berlawanan dengan aturan tangan kanan.



Gambar 1.21.  
Gaya Lorentz mengikuti aturan tangan kanan

Jika kita tinjau besarnya saja, menurut aturan perkalian silang gaya Lorentz dapat dituliskan sebagai

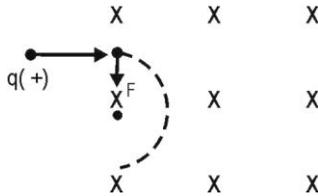
$$F = qvB \sin \theta \tag{1.33}$$

di mana  $\theta$  adalah sudut yang dibentuk oleh vektor  $\vec{v}$  dan  $\vec{B}$ .

Jika sebuah muatan  $q$  memasuki daerah medan magnet homogen (digambarkan  $\perp$  bidang gambar menjauhi kita) yang kuat medannya  $B$ , dengan kecepatan  $v$  dan arah kecepataannya tegak lurus arah medan magnet seperti pada Gambar 1.22, maka muatan akan mengalami gaya Lorentz sebesar

$$F = qvB \sin 90^\circ = qvB \tag{1.34}$$

dan arah gaya Lorentz yang setiap saat tegak lurus  $\vec{v}$  dan  $\vec{B}$  menyebabkan muatan  $q$  bergerak melingkar seperti pada Gambar 1.22.



Gambar 1.22.  
Gerak muatan di dalam medan magnet

Jika muatan  $q$  memasuki medan magnet homogen dengan arah tidak tegak lurus  $\vec{B}$ , maka muatan  $q$  akan bergerak dengan lintasan menyerupai spiral.

**Contoh 1.13**

Sebuah partikel bermuatan  $10^{-6}$  C bergerak memasuki medan magnet homogen yang kuat medannya 0,5 T. Partikel memasuki medan magnet dengan arah tegak lurus arah medan magnet dan mengalami gaya Lorentz sebesar  $5 \times 10^{-3}$  N. Berapa besar kecepatan partikel?

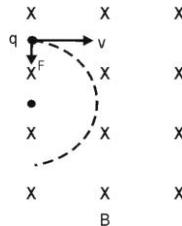
*Penyelesaian :*

Karena arah gerak partikel tegak lurus medan magnet maka partikel akan bergerak melingkar, dan besarnya gaya Lorentz dinyatakan dengan persamaan (1.34),

$$F = qvB$$

atau

$$v = \frac{F}{qB} = \frac{5 \times 10^{-3}}{(10^{-6})(0,5)} = 10^4 \text{ m/s}$$



**Contoh 1.14**

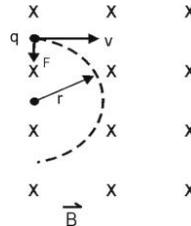
Sebuah elektron bergerak dengan kecepatan  $10^6$  m/s memasuki medan magnet homogen yang kuat medannya 10 T dengan arah elektron tegak lurus arah medan magnet. Jika massa elektron besarnya  $9,11 \times 10^{-31}$  kg dan

muatannya  $1,6 \times 10^{-19}$  C, tentukan besarnya jari-jari lintasan elektron di dalam medan magnet tersebut.

*Penyelesaian:*

Elektron di dalam medan magnet akan bergerak melingkar dengan jari-jari  $r$ . Besarnya gaya Lorentz yang dialami elektron,

$$F = qvB$$



dan gaya ini menyebabkan elektron bergerak melingkar, artinya gaya Lorentz menjadi gaya sentripetal bagi gerak melingkar elektron. Besarnya gaya sentripetal elektron juga dapat dinyatakan dengan persamaan

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

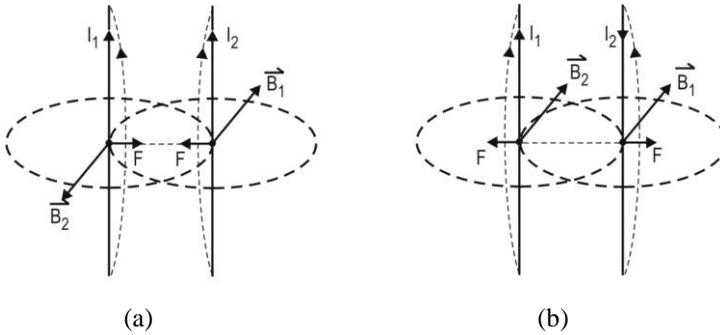
sehingga kita dapatkan persamaan

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \quad \text{atau} \quad r = \frac{mv}{qB} = \frac{(9,11 \times 10^{-31})(10^6)}{(1,6 \times 10^{-19})(10)} = 5,7 \times 10^{-7} \text{ m.}$$

#### D. GAYA LORENTZ PADA DUA BUAH KAWAT ARUS YANG SEJAJAR

Seperti telah kita ketahui arus listrik adalah muatan yang bergerak. Jika sebuah kawat arus diletakkan di dalam medan magnet maka kawat arus juga akan mengalami gaya Lorentz. Di samping itu kawat arus juga menimbulkan medan magnet di sekitarnya. Apabila dua buah kawat arus diletakkan sejajar, maka masing-masing kawat akan menghasilkan medan magnet yang mempengaruhi satu sama lain, sehingga masing-masing kawat akan mengalami gaya Lorentz.

Jika dua buah kawat arus sejajar yang sangat panjang dialiri arus listrik dengan arah yang sama, seperti pada Gambar 1.23a, maka arah medan magnet pada masing-masing kawat adalah seperti pada gambar tersebut, sehingga gaya Lorentz yang dihasilkan pada kedua kawat tersebut seolah-olah bersifat tarik-menarik. Akibatnya kedua kawat akan melengkung ke dalam. Jika arah arus pada kedua kawat sejajar tersebut berlawanan arah, maka medan magnet pada masing-masing kawat adalah seperti pada Gambar 1.23b, sehingga pada masing-masing kawat bekerja gaya Lorentz yang arahnya seolah-olah tolak-menolak. Akibatnya kedua kawat akan melengkung ke luar.



Gambar 1.23.

Gaya Lorentz antara dua kawat arus sejajar (a) gaya Lorentz antara dua kawat sejajar dengan arus searah, dan (b) gaya Lorentz antara dua kawat sejajar dengan arus berlawanan

Gaya Lorentz yang bekerja pada masing-masing kawat sejajar ini sama besarnya, dan besarnya dinyatakan dalam gaya persatuan panjang

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d} \quad (1.35)$$

di mana  $I_1$  dan  $I_2$  adalah besarnya arus yang mengalir pada masing-masing kawat (kawat 1 dan kawat 2),  $\ell$  adalah panjang kawat, dan  $d$  adalah jarak antara kedua kawat.

**Contoh 1.15**

Dua buah kawat arus sejajar berjarak 0,5 m dialiri arus yang sama besar, yaitu 10 A. Tentukan besarnya gaya persatuan panjang yang bekerja pada masing-masing kawat.

*Penyelesaian :*

Kita pergunakan persamaan (1.35)

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d}$$

dengan  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$ ,  $d = 0,5\text{m}$  dan  $I_1 = I_2 = 10 \text{ A}$  kita dapatkan

$$\frac{F}{\ell} = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(10)(10)}{(2\pi)(0,5)} \text{ N/m} = 4 \times 10^{-5} \text{ N/m}$$

Jadi gaya persatuan panjang pada masing-masing kawat sejajar itu besarnya  $4 \times 10^{-5} \text{ N/m}$ .

**Contoh 1.16**

Dua buah kawat arus sejajar masing-masing dialiri arus sebesar 50 A dan 60 A. Akibatnya pada masing-masing kawat bekerja gaya Lorentz persatuan panjang sebesar  $1,5 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ .

Berapa besar jarak antara kedua kawat?

*Penyelesaian:*

Kita pergunakan persamaan (1.35)

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d}$$

atau

$$d = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{(F/\ell)} = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(50)(60)}{2\pi (1,5 \times 10^{-3})} \text{ m} = 0,4\text{m}$$

## E. SIFAT MAGNETIK BAHAN

Telah kita pelajari arus listrik yang berupa loop arus (cincin arus), seperti pada Gambar 1.18, dapat menimbulkan medan magnet yang arahnya tegak lurus pada bidang loop (bidang cincin). Di dalam bahan (material, zat padat) sesungguhnya juga terdapat loop-loop arus yang disebabkan oleh gerakan-gerakan elektron. (Ingat, material tersusun oleh atom-atom yang mengandung elektron, dan elektron-elektron bergerak mengelilingi atom. Pada bahan logam elektron-elektron juga dapat bergerak bebas yang juga dapat membentuk loop-loop arus).

Pada beberapa jenis bahan, loop-loop arus elektron sangat teratur, sehingga menghasilkan medan-medan magnet sejajar. Perpaduan dari medan-medan magnet yang kecil-kecil ini dapat menghasilkan medan magnet yang cukup besar, dan bahannya nampak bersifat magnet yang permanen.

Pada beberapa jenis bahan yang lain loop-loop arus elektronnya sedemikian acak, sehingga medan magnet yang dihasilkan mempunyai arah yang berbeda-beda. Medan-medan magnet kecil ini akan saling menghilangkan satu sama lain, sehingga bahan tersebut tidak bersifat magnet permanen.

Sifat magnetik dari suatu bahan dapat dibangkitkan atau diperbesar dengan memberikan pengaruh medan magnet dari luar (medan eksternal), misalkan dengan melilitkan kumparan pada bahan atau mengisi *solenoida* dengan bahan. Kita ketahui bahwa di dalam *solenoida* dapat dihasilkan medan magnet yang homogen yang dapat menjadi medan eksternal pada bahan.

Dengan adanya medan eksternal maka orientasi medan-medan magnet di dalam bahan, yang dihasilkan oleh loop-loop elektron, akan berubah. Akibatnya arah medan-medan magnet di dalam bahan menjadi cenderung teratur, sehingga bahan menjadi bersifat magnetik.

Bahan dapat mempunyai sifat magnet sementara, artinya sifat magnetnya ada jika ada pengaruh medan eksternal, dan jika medan eksternal dihilangkan maka sifat magnet bahan juga hilang. Beberapa jenis bahan dapat mempunyai sifat magnet yang permanen setelah dipengaruhi medan magnet eksternal, artinya bahan masih tetap bersifat magnet meskipun sudah tidak dipengaruhi oleh medan magnet eksternal. Contoh dari bahan seperti ini adalah logam besi.

Pada pembahasan sebelumnya telah kita pelajari sifat medan magnet dari *solenoida* yang hanya berisi udara di dalamnya. Besarnya medan magnet di dalam *solenoida* dapat dinyatakan dengan persamaan (1.30)

$$B_0 = \mu_0 nI$$

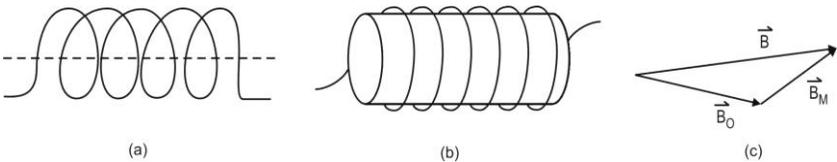
dengan  $B_0$  menyatakan medan magnet dari *solenoida* yang hanya berisi udara.

Jika di dalam *solenoida* kita isi dengan suatu bahan, maka bahan dipengaruhi oleh medan magnet  $B_0$  sehingga pada bahan timbul medan magnet yang kita misalkan besarnya  $B_M$ .

Medan magnet total yang dihasilkan dalam proses magnetisasi ini merupakan perpaduan antara  $\vec{B}_0$  dan  $\vec{B}_M$  dan dinyatakan dengan persamaan

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M \tag{1.36}$$

dengan  $\vec{B}$  menyatakan medan magnet total.



Gambar 1.24.

Medan magnet yang dihasilkan *solenoida* yang berisi bahan magnetik (a) *solenoida* kosong (berisi udara), (b) *solenoida* padat (berisi bahan magnetik), (c) medan magnet di dalam *solenoida* padat  $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M$ .

Analog dengan persamaan (1.30), besar medan magnet total dapat dinyatakan dengan

$$B = \mu nI \tag{1.37}$$

di mana  $\mu$  adalah permeabilitas magnetik bahan.

Beberapa jenis bahan seperti besi, cobalt, dan nikel, mempunyai harga  $\mu$  yang sangat besar dibandingkan dengan  $\mu_0$ , atau  $\mu \gg \mu_0$ , sehingga dapat menghasilkan medan magnet yang sangat besar di dalam *solenoida*. Bahan seperti ini dikenal sebagai bahan *feromagnetik*. Beberapa jenis bahan yang lain mempunyai harga  $\mu$  yang sedikit lebih besar atau sedikit lebih kecil dari  $\mu_0$ . Bahan dengan  $\mu > \mu_0$  dikenal sebagai bahan paramagnetik, dan bahan dengan  $\mu < \mu_0$  dikenal sebagai bahan diamagnetik.

### Contoh 1.17

Sebuah *solenoida* panjangnya 36 cm dan diameter penampangnya 1,5 cm mempunyai 600 lilitan. Jika di dalam *solenoida* diisi dengan besi, dan *solenoida* dialiri arus sebesar 40 A, maka di dalam *solenoida* dapat dihasilkan medan magnet sebesar 1,8 T. Berapa besarnya permeabilitas magnetik besi?

*Penyelesaian :*

Dengan  $N = 600$  lilitan, dan  $\ell = 36 \text{ cm} = 0,36 \text{ m}$  kita dapatkan besarnya  $n$

$$n = \frac{N}{\ell} = \frac{600}{0,36} = \frac{10^4}{6} \text{ lilitan/m}$$

Selanjutnya kita pergunakan persamaan (1.37)

$$B = \mu n I$$

atau

$$\mu = \frac{B}{nI} = \frac{1,8}{\left(\frac{10^4}{6}\right)(40)} = 2,7 \times 10^{-5} \text{ T.m/A}$$

Jadi permeabilitas magnetik besi  $2,7 \times 10^{-5} \text{ T.m/A}$ .

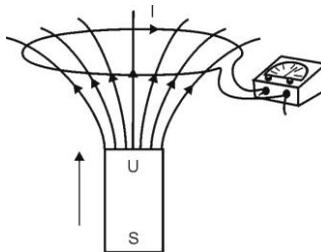
Jika kita bandingkan permeabilitas besi dengan permeabilitas ruang hampa

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{2,7 \times 10^{-5}}{4\pi \times 10^{-7}} \approx 21,5$$

Artinya permeabilitas besi 21,5 kali permeabilitas ruang hampa. Karena itu besi tergolong bahan feromagnetik. Pada umumnya *solenoida* berisi bahan feromagnetik agar dapat menghasilkan medan magnet yang besar.

## F. INDUKSI MAGNETIK

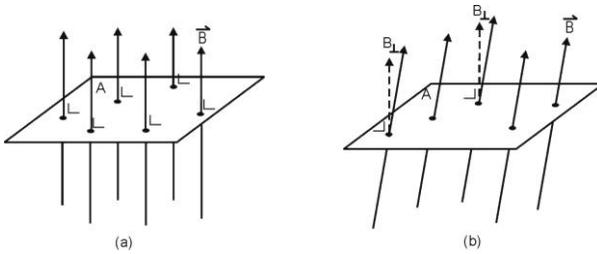
Gejala induksi magnetik pertama kali ditemukan di dalam eksperimen Michael Faraday (1791-1867). Pada mulanya Faraday melakukan percobaan dengan menggunakan sebatang magnet dan seutas kawat yang dibentuk loop dan ujung-ujungnya dihubungkan dengan sebuah amperemeter (alat pengukur arus). Gambar 1.25 merepresentasikan eksperimen Faraday.



Gambar 1.25.

Arus induksi dihasilkan karena ada perubahan fluks pada kawat loop

Jika batang magnet dalam keadaan diam, amperemeter menunjuk angka nol, artinya tidak ada arus listrik yang mengalir pada kawat. Jika batang magnet digerakkan mendekati loop maka jarum amperemeter bergerak yang menunjukkan adanya arus yang mengalir pada kawat. Demikian pula halnya jika batang magnet digerakkan menjauhi loop, pada kawat terjadi arus listrik. Faraday menyimpulkan bahwa terjadinya arus listrik pada kawat loop disebabkan terjadinya perubahan fluks, yaitu perubahan jumlah garis-garis gaya yang menembus luas penampang yang dibatasi oleh loop. Jika batang magnet didekatkan ke loop maka terjadi penambahan garis gaya yang menembus luas penampang yang dibatasi loop, sehingga terjadi arus listrik. Demikian pula jika batang magnet dijauhkan dari loop maka terjadi pengurangan garis gaya yang menembus luas penampang yang dibatasi loop, dan mengakibatkan terjadinya arus pula. Arus yang terjadi karena induksi magnetik ini dikenal sebagai *arus induksi*.



Gambar 1.26.

Medan magnet menembus luas penampang A (a)  $\vec{B} \perp A$ , (b)  $\vec{B}$  tidak  $\perp A$

Banyaknya garis gaya yang menembus suatu luas penampang, atau dikenal sebagai fluks, dinyatakan dengan persamaan

$$\Phi = BA \quad (1.38a)$$

dengan  $\Phi$  menyatakan fluks magnetik yang menembus penampang yang luasnya A. Menurut SI satuan untuk fluks magnetik adalah weber (Wb), di mana  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Tm}^2$ .

Persamaan (1.38a) berlaku untuk medan magnet yang arahnya tegak lurus penampang yang ditembusnya. Jika arah medan magnet tidak tegak lurus penampang maka yang berperan adalah komponen medan magnet yang arahnya tegak lurus penampang. Karena itu persamaan (1.38a) juga dapat dituliskan dalam bentuk

$$\Phi = B_{\perp} A$$

di mana  $B_{\perp}$  menyatakan komponen medan magnet yang arahnya tegak lurus penampang.

Untuk medan magnet homogen, di mana garis-garis gayanya sejajar, maka besarnya  $B_{\perp}$  dapat dinyatakan dengan

$$B_{\perp} = B \sin \theta \quad (1.39)$$

di mana  $\theta$  adalah sudut antara medan magnet dan bidang penampang.

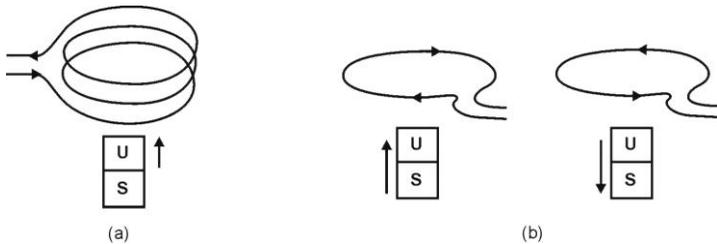
Fluks magnetik yang berubah-ubah di dalam loop kawat bersifat seperti sumber tegangan karena dapat menghasilkan arus listrik. Tegangan yang

dihasilkan oleh induksi magnetik ini dikenal sebagai gaya gerak listrik induksi (ggl induksi). Menurut Faraday besarnya ggl induksi dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\varepsilon_{\text{in}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1.40)$$

dengan  $\varepsilon_{\text{in}}$  menyatakan ggl induksi,  $N$  adalah banyaknya loop (lilitan), dan  $\Delta\Phi$  adalah perubahan fluks magnetik yang menembus penampang loop dalam selang waktu  $\Delta t$ . Persamaan (1.40) dikenal sebagai **hukum Faraday**.

Seperti telah kita pelajari sebelumnya bahwa arus listrik dapat menimbulkan medan magnet di sekitarnya, maka arus induksi pun menimbulkan medan magnet di sekitarnya. Medan magnet yang dihasilkan oleh arus induksi bersifat menentang perubahan fluks.



Gambar 1.27.

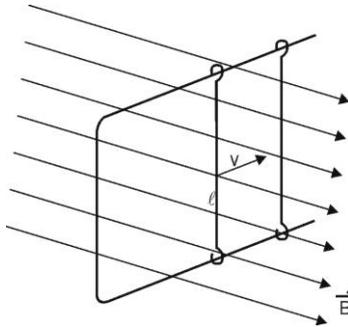
(a) Arus induksi pada suatu kumparan  $\varepsilon = -N\Delta\Phi/\Delta t$ , (b) hukum Lenz: arus induksi menentang perubahan fluks.

Jika sebuah magnet batang didekatkan pada suatu loop, seperti pada Gambar 1.27a maka jumlah garis gaya yang menembus luas penampang loop bertambah, artinya fluks membesar, dan pada kawat loop akan timbul arus induksi yang arahnya sedemikian sehingga medan magnet yang dihasilkan oleh arus induksi ini arahnya berlawanan dengan medan magnet dari magnet batang. Pada gambar ditunjukkan arah arus induksi searah dengan arah perputaran jarum jam. Arah arus induksi yang demikian dimaksudkan untuk mengurangi perubahan fluks. Keadaan sebaliknya adalah jika magnet batang dijauhkan dari loop, seperti pada Gambar 1.27b maka jumlah garis gaya yang menembus luas penampang yang dibatasi loop berkurang, artinya fluks

mengecil, dan pada kawat loop akan timbul arus induksi yang pada gambar arahnya berlawanan dengan arah perputaran jarum jam, agar dihasilkan medan magnet dari arus induksi yang searah dengan medan magnet dari magnet batang.

Dengan arah yang demikian maka medan magnet yang dihasilkan oleh arus induksi menentang perubahan fluks. Hukum alam yang berlaku pada induksi magnetik ini dan mengatur arah arus induksi ini untuk pertama kalinya ditemukan oleh Henrich Lenz seorang fisikawan Jerman, dan kemudian dikenal sebagai *hukum Lenz*.

Telah kita pelajari bahwa arus induksi dapat terjadi jika ada perubahan fluks. Pada contoh di atas perubahan fluks terjadi karena perubahan posisi dari magnet batang. Perubahan fluks juga dapat terjadi jika luas penampang loop berubah. Gambar 1.28 merepresentasikan sebuah kawat loop yang terdiri dari sebuah kawat berbentuk U dan sebuah kawat lurus yang dapat digeser-geser yang panjangnya  $\ell$ .



Gambar 1.28.

Kawat loop dengan salah satu sisinya (kawat  $\ell$ ) dapat digeser, berada dalam medan magnet

Jika kawat loop ini diletakkan di dalam medan magnet, dan kemudian kawat  $\ell$  digeser maka akan terjadi perubahan fluks akibat perubahan luas penampang loop. Akibatnya pada kawat loop akan timbul arus induksi. Jika kawat  $\ell$  digeser dengan kecepatan  $v$ , maka perubahan luas penampang ( $\Delta A$ ) dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\Delta A = \ell v \Delta t$$

di mana  $\Delta t$  adalah selang waktu pergeseran.

Dengan adanya perubahan luas penampang sebesar  $\Delta A$  maka terjadi perubahan fluks sebesar

$$\Delta\Phi = B \Delta A$$

Sehingga ggl induksi yang timbul dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\varepsilon_{\text{in}} = B \ell v \quad (1.41)$$

### Contoh 1.18

Sebuah cincin kawat mempunyai diameter 20 cm diletakkan di dalam medan magnet homogen yang kuat medannya mula-mula 0,5 T. Arah medan magnet tegak lurus penampang cincin. Jika kemudian medan magnet diperbesar sampai 1 T dalam waktu 0,5 s berapa besar ggl induksi yang timbul pada kawat?

*Penyelesaian:*

Kita anggap semua garis gaya menembus penampang cincin kawat. Jari-jari penampang adalah

$$r = \frac{20}{2} \text{ cm} = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

dan luas penampang cincin adalah  $A = \pi r^2 = \pi(0,1)^2 = 0,01 \pi \text{ m}^2$

Besarnya perubahan fluks adalah

$$\Delta\Phi = \Delta B A = (1 - 0,5)(0,01 \pi) \text{ Wb} = 0,015 \text{ Wb}$$

Besarnya ggl induksi yang ditimbulkan oleh  $\Delta\Phi$  adalah

$$\varepsilon_{\text{in}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = - \frac{0,015}{0,5} \text{ V} = 0,03 \text{ V}$$

**Contoh 1.19**

Kawat loop seperti pada Gambar 1.28 panjang sisi yang dapat digesernya adalah  $\ell = 10$  cm. Kawat loop diletakkan di dalam medan magnet yang kuat medannya 2 T. Berapa besarnya ggl induksi yang timbul pada kawat jika luas penampang kawat diperbesar dengan menggeser kawat  $\ell$  dengan kecepatan 0,5 m/s?

*Penyelesaian:*

Kita anggap arah medan magnet tegak lurus penampang loop. Ggl induksi dicari dengan menggunakan persamaan (1.41)

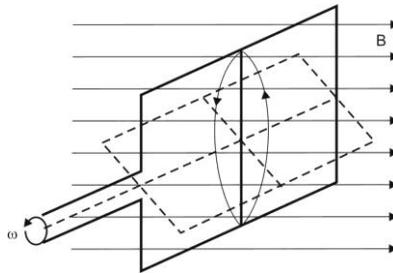
$$\varepsilon_{\text{in}} = B \ell v$$

Dengan  $B = 2$  T,  $\ell = 10$  cm = 0,1 m dan  $v = 0,5$  m/s kita dapatkan

$$\varepsilon_{\text{in}} = (2)(0,1)(0,5) = 0,1 \text{ V}$$

**G. ARUS BOLAK-BALIK**

Jika sebuah kawat loop seperti pada Gambar 1.29 diputar di dalam medan magnet, dengan sumbu putarnya tegak lurus arah medan, maka akan terjadi perubahan fluks yang menembus penampang loop. Perubahan fluks ini membesar-mengecil secara periodik, di mana fluks terbesar adalah pada saat posisi penampang tegak lurus arah medan, dan fluks terkecil adalah pada saat posisi penampang sejajar dengan arah medan. Perubahan fluks ini menyebabkan timbulnya ggl atau arus induksi yang berubah secara periodik pula. Ggl dan arus yang timbul ini dikenal sebagai ggl dan arus bolak-balik.



Gambar 1.29.

Perputaran kawat loop di dalam medan magnet menghasilkan tegangan/ arus bolak-balik

Kawat loop yang diputar di dalam medan magnet dapat berupa sebuah kumparan. Jika sebuah kumparan dengan  $N$  buah lilitan yang diputar di dalam medan magnet yang kuat medannya  $B$  dan kecepatan putarnya  $\omega$ , maka pada kumparan akan timbul ggl dan arus induksi yang besarnya dinyatakan dengan persamaan

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos \omega t \tag{1.42}$$

$$I = I_0 \cos \omega t \tag{1.43}$$

dengan  $\varepsilon_0$  dan  $I_0$  menyatakan amplitudo dari tegangan (ggl) dan arus bolak-balik. Dapat dibuktikan dengan menggunakan persamaan (1.40) bahwa amplitudo tegangan dapat dinyatakan dengan persamaan

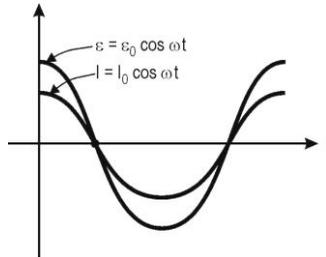
$$\varepsilon_0 = NAB \omega \tag{1.44}$$

di mana  $A$  adalah luas penampang kumparan.

Kecepatan putaran dapat dinyatakan dalam frekuensi osilasi  $f$  sebagai  $\omega = 2\pi f$ . Pada umumnya untuk listrik yang dipergunakan dalam kehidupan sehari-hari mempergunakan frekuensi 50-60 hertz.

Persamaan (1.42) dan (1.43) dapat digambarkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 1.30. Gambar tersebut menunjukkan perubahan tegangan dan arus bolak-balik sebagai fungsi dari waktu. Untuk setiap

setengah periode terjadi perubahan arah arus yang digambarkan dengan perubahan harga arus dari positif ke negatif atau sebaliknya.



Gambar 1.30.  
Grafik tegangan dan arus bolak-balik sebagai fungsi waktu

Jika kita melakukan pengukuran terhadap tegangan dan arus bolak-balik, maka yang terukur adalah harga efektifnya, di mana harga efektif dari tegangan dan arus bolak-balik dapat dinyatakan dengan

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}} \quad (1.45)$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad (1.46)$$

### Contoh 1.20

Sebuah kumparan terdiri dari 100 lilitan dan mempunyai diameter 10 cm diputar di dalam medan magnet yang kuat medannya 2 T dengan kecepatan putar  $100 \pi$  rad/s. Tentukanlah:

1. amplitudo tegangan induksi yang dihasilkan pada kumparan
2. persamaan tegangan sebagai fungsi dari waktu
3.  $\varepsilon_{\text{eff}}$  dan  $I_{\text{eff}}$  jika hambatan kawat pada kumparan besarnya  $0,5 \Omega$
4. persamaan arus induksi sebagai fungsi dari waktu

*Penyelesaian:*

1. Amplitudo tegangan ( $\varepsilon_0$ ) dicari dengan menggunakan persamaan (1.44),

$$\varepsilon_0 = NAB\omega$$

Dengan jari-jari kumparan  $r = \frac{10}{2} \text{ cm} = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$  maka luas penampang kumparan

$$A = \pi r^2 = \pi (0,05)^2 = 2,5 \pi \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

sehingga kita dapatkan

$$\varepsilon_0 = 100 \times 2,5\pi \times 10^{-3} \times 2 \times 100 \pi \text{ V} = 493,5 \text{ V}$$

2. Persamaan tegangan bolak-balik sebagai fungsi waktu

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos \omega t = 493,5 \cos (100 \pi t)$$

3. Tegangan efektif

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}} = \frac{493,5}{\sqrt{2}} \text{ V} = 349 \text{ V}$$

Arus efektif dicari dengan menggunakan hukum Ohm

$$\varepsilon_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} R \quad \text{atau} \quad I_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_{\text{eff}}}{R} = \frac{349}{0,5} \text{ A} = 698 \text{ A}$$

4. Untuk menentukan persamaan arus listrik kita cari dahulu besarnya amplitudo arus dari persamaan

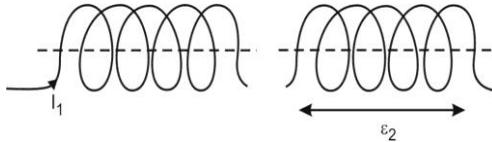
$$I_{\text{eff}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad \text{atau} \quad I_0 = I_{\text{eff}} \sqrt{2} = 698 (\sqrt{2}) = 987,1 \text{ A}$$

Jadi kita dapatkan persamaan arus bolak-balik  $I = I_0 \cos \omega t = 987,1 \cos (100 \pi t)$

## H. INDUKTANSI

Jika dua buah kumparan diletakkan berdekatan dengan penampangnya berhadapan seperti pada Gambar 1.31, dan salah satu kumparan dialiri arus

listrik, maka akan ada medan magnet dari kumparan pertama yang menembus penampang kumparan kedua, atau pada kumparan kedua terdapat fluks magnetik.



Gambar 1.31.

Arus bolak-balik yang mengalir pada kumparan 1 menimbulkan tegangan induksi (bolak-balik) pada kumparan 2

Jika arus listrik pada kumparan pertama berubah, maka fluks magnetik pada kumparan kedua berubah dan akibatnya pada kumparan kedua timbul ggl induksi yang besarnya dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\varepsilon_2 = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad (1.47)$$

dengan  $\varepsilon_2$  menyatakan ggl induksi yang timbul pada kumparan kedua akibat adanya perubahan arus pada kumparan pertama sebesar  $\Delta I_1$  dalam selang waktu  $\Delta t$ . Besaran  $M$  dikenal sebagai induktansi bersama dengan satuannya menurut SI adalah *henry* (H), di mana  $1H = 1 \Omega s$ . Pemberian nama satuan ini adalah sebagai penghargaan terhadap Joseph Henry (1797-1878), seorang fisikawan Amerika, atas jasanya dalam bidang elektromagnetika.

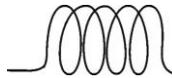
Ggl induksi juga dapat timbul pada kumparan tunggal. Jika sebuah kumparan dialiri arus listrik maka di dalam kumparan akan timbul medan magnet, dan karena medan magnet ini menembus penampang kumparan maka pada kumparan terdapat fluks magnetik. Jika arus pada kumparan berubah maka fluks berubah dan akibatnya timbul ggl induksi yang sifatnya menentang perubahan fluks. Jika tegangan awal menurun, artinya arus mengecil, maka ggl induksi akan berharga positif, artinya arus induksi akan searah dengan arus semula. Sebaliknya jika tegangan awal naik, artinya arus membesar, maka ggl induksi akan berharga negatif, artinya arus induksi akan berlawanan arah dengan arus semula.

Analog dengan persamaan (1.47), besarnya ggl induksi pada kumparan tunggal dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\varepsilon_{in} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (1.48)$$

dengan  $L$  menyatakan induktansi diri, yang mempunyai satuan yang sama dengan satuan induktansi bersama, yaitu *henry* (H).

Induktansi diri sering disebut *induktor*. Di dalam rangkaian listrik induktor digambarkan dengan simbol seperti pada Gambar 1.32. Di dalam rangkaian arus bolak-balik, yang akan kita pelajari kemudian, biasanya induktor dirangkai dengan hambatan (*resistor*) dan kapasitor, sehingga dikenal dengan rangkaian RLC.



Gambar 1.32.  
Simbol induktor

Ggl induksi selain dapat dinyatakan dengan persamaan (1.48) juga dapat dinyatakan dengan persamaan (1.40)

$$\varepsilon_{in} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

sehingga dapat kita tuliskan persamaan

$$-L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

atau

$$L = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta I} \quad (1.49)$$

Untuk *solenoida* dapat dibuktikan bahwa  $L$  dapat dinyatakan dengan persamaan

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} \quad (1.50)$$

dengan  $N$  adalah jumlah lilitan pada solenoida,  $A$  adalah luas penampang solenoida dan  $\ell$  adalah panjang solenoida.

Setiap kumparan menyimpan energi yang tersimpan di dalam medan magnetnya. Besarnya energi yang tersimpan pada kumparan (solenoida) dinyatakan dengan persamaan

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1.51)$$

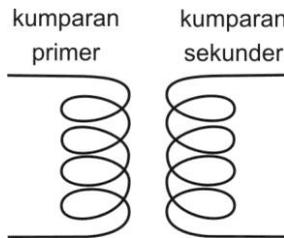
Jika kumparan menghasilkan medan magnet sebesar  $B$ , maka energi yang tersimpan dapat dinyatakan dengan

$$E = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \quad (1.52)$$

Jika kumparan diisi dengan bahan feromagnetik maka  $\mu_0$  pada persamaan (1.52) diganti dengan  $\mu$  (permeabilitas magnetik bahan).

## I. TRANSFORMATOR

Transformator adalah alat untuk menaikkan atau menurunkan tegangan. Prinsipnya transformator terdiri dari dua buah kumparan yang tersusun seperti pada Gambar 1.33. Kumparan pertama disebut *kumparan primer*. Kumparan ini dihubungkan dengan sumber tegangan input. Kumparan kedua disebut *kumparan sekunder* yang akan menghasilkan tegangan output.



Gambar 1.33.  
Bagan tranformator

Jika kumparan primer diberi tegangan bolak-balik, maka pada kumparan tersebut terjadi arus bolak-balik yang menyebabkan terjadinya perubahan fluks pada kedua kumparan. Pada dasarnya perubahan fluks yang terjadi pada kumparan sekunder sama besarnya dengan perubahan fluks yang terjadi pada kumparan primer, sehingga perbandingan antara tegangan (induksi) yang dihasilkan pada kumparan sekunder dengan tegangan yang diberikan pada kumparan primer dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (1.53)$$

di mana  $V_p$  adalah tegangan pada kumparan primer,  $V_s$  adalah tegangan pada kumparan sekunder,  $N_p$  adalah jumlah lilitan pada kumparan primer, dan  $N_s$  adalah jumlah lilitan pada kumparan sekunder.

Jika tidak ada energi yang hilang, misalkan karena berubah menjadi panas, maka pada kedua kumparan berlaku hukum kekekalan energi di mana energi dari kumparan primer dipindahkan ke kumparan sekunder. Dengan menggunakan hukum kekekalan energi dapat dibuktikan bahwa perbandingan arus pada kedua kumparan dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \quad (1.54)$$

dengan  $I_p$  dan  $I_s$  menyatakan arus pada kumparan primer dan sekunder.

Dari persamaan (1.53) dapat kita katakan bahwa tegangan *output* yang dihasilkan oleh suatu transformator dapat lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan inputnya, tergantung pada jumlah lilitan pada kumparan sekundernya. Jika  $N_s > N_p$  maka  $V_s > V_p$  artinya tegangan output lebih besar dari tegangan input. Transformator dengan tipe ini dikenal sebagai *transformator step-up*. Sebaliknya jika  $N_s < N_p$  maka  $V_s < V_p$  artinya tegangan output lebih kecil dari tegangan input. Transformator dengan tipe ini dikenal sebagai *transformator step-down*.

### Contoh 1.21

Tentukan besarnya induktansi diri dari sebuah kumparan yang panjangnya 10 cm dan jari-jari penampangnya 2 cm, yang mempunyai 100 lilitan.

*Penyelesaian :*

Kita pergunakan persamaan (1.50)

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

dengan  $\ell = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$ ;  $r = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$ ;  $A = \pi r^2 = \pi (0,02)^2 \text{ m}^2$ ;  
 $N = 100$  lilitan;  
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$  kita dapatkan

$$L = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(100)^2(4\pi \times 10^{-4})}{0,1} \text{ H} \approx 1,6 \times 10^{-4} \text{ H}$$

### Contoh.1.22

Berapa besarnya ggl induksi yang terjadi pada suatu kumparan yang mempunyai induktansi diri sebesar  $10^{-5} \text{ H}$ , jika arus pada kumparan berubah dari  $10 \text{ A}$  menjadi  $15 \text{ A}$  dalam waktu  $0,01 \text{ s}$ .

*Penyelesaian:*

Kita pergunakan persamaan (1.48)

$$\mathcal{E}_{in} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Dengan  $L = 10^{-5} \text{ H}$ ,  $\Delta I = (15-10) \text{ A} = 5 \text{ A}$  dan  $\Delta t = 0,01 \text{ s}$  kita dapatkan

$$\mathcal{E}_{in} = - (10^{-5}) \frac{5}{0,01} \text{ V} = -5 \times 10^{-3} \text{ V} = -5 \text{ mV}$$

### Contoh 1.23

Sebuah transformator didesain untuk mengubah tegangan input  $220 \text{ V}$  menjadi tegangan output  $1100 \text{ V}$ . Jika kumparan primernya mempunyai  $5000$  lilitan, tentukanlah:

1. jumlah lilitan pada kumparan sekunder;
2. arus listrik pada kumparan sekunder jika pada kumparan primer arusnya  $50 \text{ A}$ .

*Penyelesaian:*

1. Kita pergunakan persamaan (1.53)

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

Dengan  $N_p = 5000$ ,  $V_p = 220$  V,  $V_s = 1100$  V kita dapatkan

$$N_s = \frac{(5000)(1100)}{220} \text{ lilitan} = 25.000 \text{ lilitan}$$

2. Kita pergunakan persamaan (1.54)

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \Rightarrow I_s = \frac{N_p I_p}{N_s}$$

Dengan  $I_p = 50$  A kita dapatkan  $I_s = \frac{(5000)(50)}{25000}$  A = 10 A

## J. RANGKAIAN RLC

Rangkaian arus bolak-balik biasanya mengandung beban listrik seperti *hambatan (R)*, *induktor (L)* dan *kapasitor (C)* sehingga sering disebut rangkaian RLC. Hambatan total dari rangkaian RLC dikenal sebagai *impedansi (Z)*. Untuk rangkaian RLC seri seperti pada Gambar 1.34, besarnya impedansi dapat dinyatakan dengan persamaan

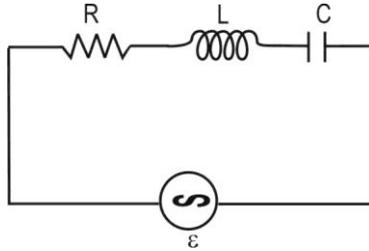
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (1.55)$$

dengan

$$X_L = \omega L \quad (1.56)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (1.57)$$

dengan  $\omega = 2\pi f$ , dan  $f$  adalah frekuensi osilasi dari arus atau tegangan bolak-balik.  $X_L$  dan  $X_C$  masing-masing dikenal sebagai reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif.



Gambar 1.34.  
Rangkaian RLC seri.

Hukum Ohm pada rangkaian RLC dapat dinyatakan dengan persamaan

$$V_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} Z \quad (1.58)$$

atau

$$V_0 = I_0 Z \quad (1.59)$$

di mana  $V_{\text{eff}}$  dan  $I_{\text{eff}}$  menyatakan tegangan dan arus efektif, dan  $V_0$  dan  $I_0$  menyatakan amplitudo dari tegangan dan arus bolak-balik.

Keadaan di mana  $X_L = X_C$  dikenal sebagai keadaan *resonansi*. Dalam hal ini besarnya impedansi adalah  $Z = R$ . Besarnya frekuensi osilasi yang menyebabkan keadaan resonansi, atau dikenal sebagai *frekuensi resonansi* ( $f_r$ ), yang harganya dapat diturunkan dari persamaan

$$X_L = X_C$$

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

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.60)$$

dengan  $\omega_r = 2\pi f_r$  dan  $f_r$  adalah frekuensi resonansi.

**Contoh 1.24**

Sebuah rangkaian RLC terdiri dari hambatan  $R = 2 \Omega$ , induktor  $L = 3,6 \text{ mH}$  dan kapasitor  $C = 5,43 \times 10^{-7} \text{ F}$ . Tentukanlah:

1. besarnya impedansi pada rangkaian jika frekuensi tegangan bolak-baliknya 3000 Hz;
2. besarnya arus pada rangkaian jika diberi tegangan efektif 200 V;
3. besarnya frekuensi resonansi.

*Penyelesaian:*

1. Kita pergunakan persamaan (1.55)

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

Dengan  $R = 2 \Omega$ ,  $\omega = 2\pi f = (2\pi)(3000) \text{ rad} = 6000\pi \text{ rad}$ ,  $L = 3,6 \text{ mH} = 3,6 \times 10^{-3} \text{ H}$  dan

$C = 5,43 \times 10^{-7} \text{ F}$  kita dapatkan  $X_L = \omega L = 6000\pi \times 3,6 \times 10^{-3} \Omega = 21,6\pi \Omega = 67,9 \Omega$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{6000\pi \times 5,43 \times 10^{-7}} \Omega = 97,7 \Omega$$

$$Z = \sqrt{2^2 + (67,9 - 97,7)^2} \Omega = 29,9 \Omega$$

2. Kita pergunakan hukum Ohm

$$V_{\text{eff}} = I_{\text{eff}} Z \quad \Rightarrow \quad I_{\text{eff}} = \frac{V_{\text{eff}}}{Z} = \frac{200}{29,9} \text{ A} = 6,7 \text{ A}$$

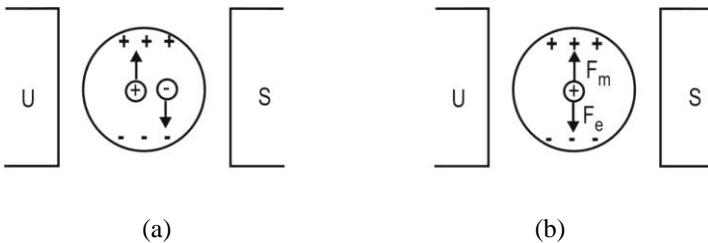
3. Kita pergunakan persamaan (1.60)

$$f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{3,6 \times 10^{-3} \times 5,43 \times 10^{-7}}} \text{ Hz} = 3600 \text{ Hz}$$

### K. PENGUKURAN ALIRAN DARAH DENGAN METODE ELEKTROMAGNETIK

Pengukuran kecepatan aliran darah dapat diukur dengan berbagai metode, salah satunya adalah dengan metode yang berbasis elektromagnetik. Alat ukurnya dikenal sebagai *electromagnetic flowmeter*. Prinsip pengukurannya didasarkan pada gerakan muatan (ion) di dalam medan magnet. Di dalam darah terkandung banyak sekali ion-ion. Di dalam plasma darah terkandung sekitar  $145 \times 10^{-3}$  mol/liter ion  $\text{Na}^+$  dan sekitar  $125 \times 10^{-3}$  mol/liter ion  $\text{Cl}^-$  serta ion-ion lain dalam jumlah mol yang sangat kecil dibandingkan dengan kedua jenis ion tersebut.

Jika pembuluh darah diletakkan di dalam medan magnet dengan arah medan sejajar dengan penampang pembuluh, seperti pada Gambar 1.35, maka ion-ion di dalam darah akan mengalami gaya Lorentz yang arahnya seperti pada gambar tersebut, yaitu ion positif mendapat gaya ke atas dan ion negatif mendapat gaya ke bawah.



Gambar 1.35.

Prinsip pengukuran kecepatan aliran darah dengan metode elektromagnetik  
(a) Polarisasi pada pembuluh arteri, dan (b) Keadaan setimbang,  $F_e = F_m$

Akibat adanya gaya Lorentz ini maka terjadi penumpukan ion-ion positif pada dinding pembuluh bagian atas dan ion-ion negatif pada dinding pembuluh bagian bawah, atau kita katakan terjadi polarisasi pada dinding atas dan dinding bawah. Dengan adanya polarisasi ini maka dinding pembuluh menjadi bersifat seperti kapasitor plat sejajar dengan jarak antar platnya sama dengan diameter pembuluh, dan sebagai akibatnya di dalam pembuluh juga terdapat medan listrik yang besarnya dapat dinyatakan dengan

$$E = \frac{V}{d} \quad (1.61)$$

di mana  $V$  adalah beda potensial antara dua dinding pembuluh darah, dan  $d$  adalah diameter pembuluh.

Penumpukan muatan akan berlangsung terus sampai medan listrik yang dihasilkannya mencapai suatu keadaan tertentu di mana ion-ion yang berada di dalam darah mendapat gaya listrik dan gaya magnetik yang besarnya sama tetapi arahnya berlawanan (Gambar 1.35b). Keadaan ini dikenal sebagai keadaan setimbang. Jika  $F_e$  menyatakan gaya listrik dan  $F_m$  menyatakan gaya magnetik yang bekerja pada sebuah ion, di mana  $F_e$  dan  $F_m$  dapat dinyatakan dengan

$$\begin{aligned} F_e &= qE \\ F_m &= qvB \end{aligned}$$

di mana  $q$  adalah muatan ion,  $v$  adalah kecepatan gerakan ion, dan  $B$  adalah kuat medan magnet, maka keadaan setimbang dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\begin{aligned} F_e &= F_m \\ qE &= qvB \\ \frac{qV}{d} &= qvB \end{aligned}$$

sehingga kita dapatkan persamaan

$$v = \frac{V}{Bd} \quad (1.62)$$

Jadi dengan memberikan medan magnet pada pembuluh darah, dan kemudian mengukur beda potensial di antara dinding pembuluh darah yang sudah diketahui diameternya, maka dapat ditentukan kecepatan ion, yang merupakan representasi dari kecepatan aliran darah.

Beda potensial di antara kedua bagian dinding pembuluh darah sangat kecil. Sebagai contoh, pengukuran pada arteri yang berdiameter 1 cm, di mana kecepatan rata-rata dari aliran darahnya sekitar 30 cm/s, jika berada di dalam medan magnet yang kuat medannya 1000 gauss hanya memberikan

beda potensial sekitar  $300 \mu V$  (mikrovolt =  $10^{-6}$  V). Jadi untuk pengukurannya diperlukan alat yang sangat sensitif.

Kesulitan lain dalam penggunaan metode ini adalah adanya interaksi antara muatan yang terakumulasi di dinding pembuluh dengan muatan lain di luar cairan darah, sehingga sulit dibedakan antara potensial polarisasi dan potensial lainnya. Akan tetapi kesulitan ini dapat diatasi dengan memberikan medan magnet yang arahnya bolak-balik secara periodik dengan periode (atau frekuensi) tertentu. Pembahasan secara rinci mengenai teknik-teknik untuk mengatasi kesulitan-kesulitan pengukuran dengan metode ini tidak akan diberikan di sini, tetapi yang perlu kita ketahui adalah dengan adanya kemajuan teknologi segala kesulitan pengukuran dapat diatasi.

### Contoh 1.25

Pengukuran beda potensial pada arteri yang berdiameter 1,2 cm dengan medan magnet sebesar 800 gauss menunjukkan beda potensial sebesar  $250 \mu V$ . Berapa besar volume aliran darah (dalam  $m^3/s$ ) di dalam arteri?

*Penyelesaian:*

Volume darah di dalam arteri dapat kita nyatakan dengan

$$Vol = Ax \quad (1)$$

dengan A adalah luas penampang arteri dan x adalah panjang arteri.

Kecepatan aliran darah di dalam arteri dapat dinyatakan dengan persamaan (1. 62)

$$v = \frac{V}{Bd} \quad (2)$$

Jika dalam waktu t aliran darah menempuh jarak x, maka kecepatan aliran darah juga dapat dinyatakan dengan persamaan

$$v = \frac{x}{t} \quad (3)$$

atau

$$x = vt \quad (4)$$

Substitusi persamaan (2) ke (4) menghasilkan

$$x = \frac{Vt}{Bd} \quad (5)$$

dan substitusi persamaan (5) ke persamaan (1) menghasilkan

$$Vol = \frac{AVt}{Bd} \quad (6)$$

Volume aliran darah dinyatakan dengan persamaan

$$Q = \frac{Vol}{t} = \frac{AV}{Bd}$$

Dengan  $r = 1,2/2 \text{ cm} = 0,6 \text{ cm} = 6 \times 10^{-3} \text{ m}$ ;  $A = \pi r^2 = \pi (6 \times 10^{-3})^2 \text{ m}^2$ ;  $V = 250 \mu\text{V} = 2,5 \times 10^{-4} \text{ V}$ ;  $B = 800 \text{ gauss} = 800 \times 10^{-4} \text{ T} = 8 \times 10^{-2} \text{ T}$ ;  $d = 1,2 \text{ cm} = 1,2 \times 10^{-2} \text{ m}$  kita dapatkan

$$Q = \frac{\pi \times (6 \times 10^{-3})^2 \times 2,5 \times 10^{-4}}{8 \times 10^{-2} \times 1,2 \times 10^{-2}} \text{ m}^3/\text{s} = 2,95 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

## L. BAHAYA LISTRIK BAGI MANUSIA

Aliran listrik dapat berbahaya bagi manusia, karena dapat menyebabkan kerusakan pada tubuh, dan bahkan dapat menyebabkan kematian. Sengatan listrik pada bagian kulit dapat menyebabkan kulit terbakar. Jika aliran listrik melalui jaringan syaraf, jantung atau organ-organ vital lainnya, maka organ-organ tersebut akan mengalami gangguan fungsinya, dan jika aliran listrik yang melalui tubuh mempunyai daya yang cukup besar maka dapat menyebabkan kematian.

Arus listrik terkecil yang bisa dirasakan oleh tubuh kita adalah sekitar 1mA. Arus listrik yang besarnya beberapa mA dapat menyebabkan sedikit gangguan dan kerusakan pada manusia. Arus listrik di atas 10 mA dapat menyebabkan kerusakan pada bagian telapak tangan atau telapak kaki. Arus listrik di atas 70 mA jika melalui jantung akan menyebabkan kontraksi yang tak teratur, sehingga aliran darah juga terganggu, dan jika terjadi cukup lama akan menyebabkan kematian. Akan tetapi jika arus listrik lebih besar lagi,

yaitu sekitar 1A, gangguan yang terjadi pada jantung lebih ringan. Ini memang merupakan keanehan pada jantung kita.

Sejauh mana kerusakan yang dapat terjadi pada tubuh kita akibat aliran listrik tergantung dari besarnya hambatan efektif dari tubuh kita. Jaringan kulit yang mengandung banyak ion mempunyai hambatan efektif yang lebih kecil dibandingkan jaringan lainnya. Karena itu jaringan ini lebih mudah rusak jika terkena sengatan listrik. Dalam keadaan kering, jaringan kulit mempunyai hambatan efektif sekitar  $10^4 - 10^6 \Omega$ , tetapi dalam keadaan basah bisa mencapai sekitar  $10^3 \Omega$ . Seseorang yang berada dalam keadaan kontak dengan lantai dan terkena tegangan listrik sebesar 220 V akan menyebabkan tubuhnya teraliri arus listrik kira-kira sebesar  $I = 220 \text{ V} / 1000 \Omega = 0,22 \text{ A} = 220 \text{ mA}$ . Arus listrik sebesar ini cukup berbahaya bagi tubuh kita.

Pemakaian listrik di dalam rumah tangga juga berbahaya jika tidak hati-hati. Pemasangan peralatan listrik yang kurang sempurna dapat menyebabkan kita terkena aliran listrik melalui peralatan tersebut. Peralatan listrik yang tidak dilengkapi dengan sistem *grounded* jika mengalami kebocoran arus dapat menyebabkan arus tersebut mengalir melalui tubuh kita untuk mencapai tanah (*ground*). Peralatan listrik dengan desain yang lebih bagus, yaitu dengan sistem 3 kabel, masing-masing untuk tegangan +, tegangan -, dan *grounded*, di mana jika terjadi kebocoran arus listrik pada peralatan ini, sebagian besar arus mengalir melalui kabel *grounded*, dan hanya sebagian kecil saja yang melalui tubuh kita. Hal ini disebabkan oleh hambatan kabel jauh lebih kecil dibandingkan dengan hambatan tubuh kita. Jadi peralatan listrik dengan sistem *grounded* lebih aman bagi kita.



## LATIHAN

---

Untuk memperdalam pemahaman Anda mengenai materi di atas, kerjakanlah latihan berikut!

- 1) Sebuah solenoida diisi dengan bahan feromagnetik yang permeabilitas magnetiknya  $\mu$ . Solenoida mempunyai 500 lilitan dan panjang solenoida 15 cm. Jika solenoida dialiri arus sebesar 5 A, maka di dalam solenoida dapat dihasilkan medan magnet total sebesar 1,05 T. Berapakah besarnya  $\mu$ ?

- 2) Sebuah proton bergerak memasuki medan magnet homogen dengan arah tegak lurus medan magnet. Jika massa proton  $1,67 \times 10^{-27}$  kg, muatan proton  $1,6 \times 10^{-19}$  C, kuat medan magnet 2 T, dan jari-jari lintasan proton di dalam medan magnet  $10^{-8}$  m, berapakah besarnya kecepatan proton?
- 3) Dua buah kawat sejajar yang sangat panjang masing-masing dialiri arus sebesar 10 A, dan akibatnya masing-masing kawat mengalami gaya Lorentz sebesar  $4 \times 10^{-5}$  N. Berapa besarnya jarak antara kedua kawat?
- 4) Sebuah kawat bujur sangkar dengan panjang sisinya 10 cm diputar di dalam medan magnet homogen yang kuat medannya 5 T, dengan sumbu putarnya melalui bidang bujur sangkar dan tegak lurus medan magnet. Jika kecepatan sudut putarannya  $100\pi$  rad/s, berapa besar amplitudo tegangan induksi yang terjadi pada kawat?
- 5) Sebuah transformator didesain untuk mengubah tegangan dari 110 V menjadi 220 V. Kumparan primer pada transformator tersebut mempunyai 500 lilitan dan dialiri arus sebesar 10 A. Berapakah besarnya jumlah lilitan dan arus yang mengalir pada kumparan sekunder?
- 6) Suatu arus bolak-balik mempunyai amplitudo tegangan sebesar 155,5 V. Jika arus ini mengalir pada sebuah kawat aluminium yang panjangnya 5 m dan diameternya 0,5 mm, berapakah besarnya daya yang dihasilkan pada kawat?
- 7) Sebuah rangkaian RLC mempunyai frekuensi putaran sebesar  $500 \pi$  rad/s. Jika diketahui  $R = 50 \Omega$ ,  $L = 5$  mH, dan  $C = 5 \times 10^{-7}$  F, berapakah besarnya impedansi rangkaian tersebut?
- 8) Dari Contoh 1.25 tentukanlah besarnya arus listrik di dalam arteri dari ion  $\text{Na}^+$ .

*Petunjuk Jawaban Latihan*

- 1) Harga  $\mu$  dapat ditentukan dengan persamaan

$$B = \mu nI$$

atau

$$\mu = \frac{B}{nI} \quad \text{dengan} \quad n = \frac{N}{\ell} \quad \text{adalah banyaknya lilitan}$$

2) Dari Contoh 1.14 didapatkan persamaan

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

atau

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

Jadi  $v$  dapat dicari

3) Kita pergunakan persamaan

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

atau

$$d = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi \left( \frac{F}{\ell} \right)}$$

4) Fluks magnetik berubah terhadap waktu dengan persamaan

$$\Phi = BA \cos \omega t$$

Ggl dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = BA\omega \sin \omega t$$

Amplitudo tegangan adalah

$$\varepsilon_0 = BA\omega$$

5) Kita pergunakan persamaan

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

dan persamaan

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{I_p}{I_s}$$

6) Hambatan pada kawat adalah

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

dengan harga  $\rho$  aluminium dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Daya yang dihasilkan adalah

$$P = V_{\text{eff}} I_{\text{eff}} = V_{\text{eff}} \frac{V_{\text{eff}}}{R} = \frac{V_{\text{eff}}^2}{R}$$

dengan

$$V_{\text{eff}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

7) Penggunaan persamaan

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

dengan

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



## RANGKUMAN

Arus listrik dapat menyebabkan timbulnya medan magnet di sekitarnya. Besarnya medan magnet di suatu titik yang berjarak  $r$  dari suatu kawat arus dapat dinyatakan dengan persamaan

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\ell}{r^2} \sin \theta d\ell$$

di mana  $d\ell$  adalah elemen panjang kawat dan  $\theta$  adalah sudut antara vektor  $\vec{r}$  dan  $d\vec{\ell}$ .

Untuk kawat arus yang bentuknya tertentu, medan magnet di sekitarnya dapat dinyatakan dengan persamaan-persamaan sebagai berikut:

1. Medan magnet di suatu titik berjarak  $r$  dengan sebuah kawat lurus yang sangat panjang yang dialiri arus sebesar  $I$

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

2. Medan magnet di pusat suatu cincin arus yang berjari-jari  $a$

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

3. Medan magnet di dalam kumparan solenoida yang jumlah lilitannya  $N$  dan panjang solenoida  $\ell$

$$B = \mu_0 nI$$

dengan  $n = N/\ell$  adalah jumlah lilitan persatuan panjang.

Muatan yang bergerak dengan kecepatan  $v$  di dalam medan magnet yang kuat medannya  $B$  akan mengalami gaya Lorentz yang secara vektor dinyatakan dengan

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

atau besarnya

$$F = qvB \sin \theta$$

di mana  $\theta$  adalah sudut antara vektor  $\vec{v}$  dan vektor  $\vec{B}$ . Gaya Lorentz juga terjadi pada dua buah kawat arus yang sejajar. Besarnya gaya Lorentz pada masing-masing kawat sejajar tersebut dinyatakan dengan

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

Sifat magnet dari suatu bahan ditentukan oleh permeabilitas magnetik dari bahan tersebut. Makin besar permeabilitasnya makin kuat sifat magnetnya. Berdasarkan sifat magnetnya, bahan-bahan dibedakan menjadi:

1. bahan feromagnetik, jika  $\mu \gg \mu_0$
2. bahan paramagnetik, jika  $\mu > \mu_0$
3. bahan diamagnetik, jika  $\mu < \mu_0$

Jika solenoida diisi dengan bahan magnetik, maka besarnya medan magnet total di dalam solenoida dapat dinyatakan dengan

$$B = \mu nI$$

Fluks magnetik adalah banyaknya garis gaya yang menembus suatu luas penampang dengan arah tegak lurus penampang. Besarnya fluks magnetik yang menembus suatu luas penampang  $A$  dinyatakan dengan

$$\Phi = B_{\perp}A$$

di mana  $B_{\perp}$  adalah komponen medan magnet yang arahnya tegak lurus luas penampang. Jika suatu kawat loop berada di dalam medan magnet, dan fluks magnetik yang menembus luas penampang yang dibatasi loop berubah, maka pada kawat loop akan terjadi ggl induksi yang dinyatakan dengan

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

di mana  $N$  adalah banyaknya loop.

Jika perubahan fluks  $\Delta\Phi$  berubah secara periodik, maka ggl atau arus induksi yang timbul pada kawat loop juga berubah secara periodik, yang dikenal sebagai ggl atau arus bolak-balik dan dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos t \omega t$$

$$I = I_0 \cos t \omega t$$

Ggl dan arus efektif pada arus bolak-balik dinyatakan dengan

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{2}}$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

Jika dua buah kumparan diletakkan berhadapan dan salah satunya dialiri arus bolak-balik, maka pada kumparan kedua akan terjadi ggl induksi yang dinyatakan dengan

$$\varepsilon_{in} = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}$$

di mana  $M$  adalah induktansi bersama.

Ggl induksi juga terjadi pada kumparan tunggal yang dialiri arus bolak-balik, yang dinyatakan dengan

$$\varepsilon_{in} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

di mana  $L$  adalah induktansi diri.

Pada rangkaian seri RLC, besarnya impedansi dinyatakan dengan

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

dengan  $X_L$  adalah reaktansi induktif dan  $X_C$  adalah reaktansi kapasitif, sedangkan  $\omega = 2\pi f$  adalah frekuensi sudut dari arus atau tegangan bolak-balik dan  $f$  adalah frekuensi osilasinya. Keadaan dengan  $X_L = X_C$  dikenal sebagai resonansi, di mana frekuensi resonansi dinyatakan dengan persamaan

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

TES FORMATIF 2

---

Pilihlah satu jawaban yang paling tepat!

- 1) Di sebuah titik di sekitar kawat lurus panjang yang dialiri arus 10 A dihasilkan medan magnet sebesar  $5 \times 10^{-4}$  T. Jarak titik tersebut dengan kawat adalah ....
  - A. 0,2 mm
  - B. 0,5 mm
  - C. 4 mm
  - D. 5 mm
  
- 2) Sebuah cincin arus dapat menghasilkan medan magnet sebesar  $5,03 \times 10^{-4}$  T pada pusat cincin. Jika jari-jari cincin 10 cm, maka besarnya arus yang mengalir pada cincin arus ....
  - A. 20 A
  - B. 40 A
  - C. 60 A
  - D. 80 A
  
- 3) Sebuah solenoida yang panjangnya 20 cm dialiri arus sebesar 60 A. Jika solenoida diisi dengan bahan feromagnetik yang permeabilitas magnetiknya  $\mu = 3,8 \times 10^{-4}$  Tm/A, maka di dalam solenoida dapat dihasilkan medan magnet total sebesar 45,6 T. Banyaknya lilitan pada solenoida adalah ....
  - A. 300 lilitan
  - B. 400 lilitan
  - C. 500 lilitan
  - D. 600 lilitan
  
- 4) Sebuah elektron memasuki medan magnet homogen dengan kecepatan  $10^5$  m/s dan di dalam medan magnet elektron bergerak melingkar dengan jari-jari lintasan  $10^{-3}$  m. Jika massa elektron  $m_e = 9,11 \times 10^{-31}$  kg dan muatannya  $q_e = 1,6 \times 10^{-19}$  C, maka besarnya kuat medan magnet ....
  - A.  $1,8 \times 10^{-4}$  T
  - B.  $3,6 \times 10^{-4}$  T
  - C.  $5,7 \times 10^{-4}$  T
  - D.  $7,2 \times 10^{-4}$  T

- 5) Dua buah kawat sejajar yang berjarak 20 cm masing-masing dialiri arus 10 A dan 20 A. Besarnya gaya persatuan panjang pada masing-masing kawat adalah ....
- A.  $2,0 \times 10^{-4}$  N/m
  - B.  $3,2 \times 10^{-4}$  N/m
  - C.  $5,0 \times 10^{-4}$  N/m
  - D.  $6,4 \times 10^{-4}$  N/m
- 6) Sebuah kawat loop berbentuk lingkaran diletakkan di dalam medan magnet yang kuat medannya mula-mula 0,5 T. Kemudian medan magnet diperbesar sampai 1 T dalam waktu 0,5 s. Jika jari-jari lingkaran kawat 5 cm, maka besarnya ggl induksi yang terjadi pada kawat ....
- A.  $2,50 \times 10^{-4}$  V
  - B.  $3,14 \times 10^{-4}$  V
  - C.  $5,74 \times 10^{-4}$  V
  - D.  $7,85 \times 10^{-4}$  V
- 7) Suatu tegangan bolak-balik mempunyai harga efektif 219,2 V dan frekuensi osilasi 60 Hz. Tegangan bolak-balik itu dapat dinyatakan dengan persamaan ....
- A.  $V = 219,2 \cos(60 \pi t)$
  - B.  $V = 219,2 \cos(120 \pi t)$
  - C.  $V = 310 \cos(60 \pi t)$
  - D.  $V = 310 \cos(120 \pi t)$
- 8) Sebuah solenoida mempunyai induktansi diri sebesar 0,22 mH. Jika panjang solenoida 10 cm dan jari-jari penampangnya 2,5 cm maka banyaknya lilitan pada solenoida ....
- A. 200 lilitan
  - B. 300 lilitan
  - C. 400 lilitan
  - D. 600 lilitan
- 9) Rangkaian RLC dengan  $L = 10$  mH dan  $C = 2 \times 10^{-7}$  F, mempunyai frekuensi resonansi sebesar ....
- A. 795,8 Hz
  - B. 922,5 Hz
  - C. 1015,5 Hz
  - D. 1200,7 Hz

- 10) Sebuah rangkaian RLC mempunyai hambatan  $R = 100 \Omega$ , induktansi  $L = 0,2 H$  dan frekuensi sudut  $\omega = 100 \pi \text{ rad/s}$ . Jika reaktansi induktifnya dua kali reaktansi kapasitifnya, maka besarnya impedansi rangkaian RLC tersebut ....
- A.  $80 \Omega$
  - B.  $120 \Omega$
  - C.  $160 \Omega$
  - D.  $200 \Omega$

Cocokkanlah jawaban Anda dengan Kunci Jawaban Tes Formatif 2 yang terdapat di bagian akhir modul ini. Hitunglah jawaban yang benar. Kemudian, gunakan rumus berikut untuk mengetahui tingkat penguasaan Anda terhadap materi Kegiatan Belajar 2.

$$\text{Tingkat penguasaan} = \frac{\text{Jumlah Jawaban yang Benar}}{\text{Jumlah Soal}} \times 100\%$$

Arti tingkat penguasaan: 90 - 100% = baik sekali

80 - 89% = baik

70 - 79% = cukup

< 70% = kurang

Apabila mencapai tingkat penguasaan 80% atau lebih, Anda dapat meneruskan dengan modul selanjutnya. **Bagus!** Jika masih di bawah 80%, Anda harus mengulangi materi Kegiatan Belajar 2, terutama bagian yang belum dikuasai.

## Kunci Jawaban Tes Formatif

### *Tes Formatif 1*

- 1) D
- 2) D
- 3) D
- 4) D
- 5) C
- 6) C

### *Tes Formatif 2*

- 1) C
- 2) D
- 3) B
- 4) C
- 5) A
- 6) D
- 7) D
- 8) B
- 9) A
- 10) C