

# Bab 1

## Muatan dan Materi

(ref: Bab 23)

### 1.1 Teori

\*  $\Rightarrow$  Elektromagnetisme \*  $\Rightarrow$  Muatan listrik \*  $\Rightarrow$  Konduktor, isolator, dan semikonduktor \*  $\Rightarrow$  Coulomb dan ampere \*  $\Rightarrow$  Hukum Coulomb \*  $\Rightarrow$  Superposisi untuk banyak muatan titik \*  $\Rightarrow$  Muatan itu terkuantisasi \*  $\Rightarrow$  Sifat kelistrikan bahan \*  $\Rightarrow$  Muatan itu terkonservasi

#### 1.1.1 Elektromagnetisme

Elektromagnetisme adalah deskripsi mengenai interaksi yang melibatkan muatan listrik. Elektromagnetisme klasik, yang dirangkum dalam persamaan Maxwell, mencakup fenomena kelistrikan, kemagnetan, induksi elektromagnetik (generator listrik), dan radiasi elektromagnetik, yang juga mencakup semua fenomena optik.

#### 1.1.2 Muatan listrik

Kekuatan interaksi elektromagnetik partikel sebagian ditentukan oleh muatan listriknya, yang dapat berjenis positif atau negatif. Muatan sejenis tolak-menolak, muatan lain jenis tarik-menarik. Benda dengan jumlah muatan positif dan negatif yang sama banyak dikatakan netral secara elektrik, sementara itu benda yang kelebihan salah satu jenis muatan dikatakan 'termuatani' secara elektrik.

### 1.1.3 Konduktor, isolator, dan semikonduktor

Konduktor adalah bahan dengan partikel bermuatan yang bebas bergerak (elektron dalam logam) dalam jumlah yang signifikan banyak. Partikel bermuatan dalam isolator tidaklah bebas. Semikonduktor berada di antara sifat konduktor dan isolator.

### 1.1.4 Coulomb dan ampere

Satuan SI untuk muatan adalah coulomb (C). Coulomb didefinisikan dalam satuan arus ampere (A) sebagai muatan yang melintasi titik tertentu ketika arus yang mengalir adalah satu ampere; lihat Pers.(1.1).

#### Hubungan arus dan muatan

Arus dan muatan mempunyai hubungan

$$q = it \quad (1.1)$$

dengan  $q$ : muatan,  $i$ : arus,  $t$ : waktu. Contoh 1 menggambarkan muatan listrik dalam jumlah besar yang berada dalam sampel bahan biasa.

### 1.1.5 Hukum Coulomb

Hukum Coulomb menerangkan gaya antara muatan-muatan (titik) kecil diam. Dalam bentuk SI,

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1.2)$$

$\epsilon_0$  secara eksperimental ditetapkan sebesar  $8,854 \times 10^{-12} \text{C}^2/\text{N}^2 \cdot \text{m}^2$ . Sementara itu

$$1/4\pi\epsilon_0 = 8,99 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2.$$

### 1.1.6 Superposisi untuk banyak muatan titik

Gaya tarik-menarik atau tolak-menolak antar dua muatan titik diam bekerja sepanjang garis penghubung dua muatan itu. Bila ada lebih dari dua muatan, Pers. (1.2) berlaku untuk gaya antar masing-masing pasangan. Selanjutnya gaya resultan pada setiap muatan dihitung (dengan prinsip superposisi) sebagai jumlahan vektor dari gaya-gaya yang bekerja pada muatan itu yang disebabkan oleh semua muatan lainnya.

### 1.1.7 Muatan itu terkuantisasi

Muatan listrik itu terkuantisasi. Artinya, setiap muatan yang ditemukan di alam dapat dituliskan sebagai  $ne$ , dengan  $n$  adalah bilangan bulat positif atau negatif dan  $e$  adalah konstanta alam yang dinamakan *muatan elektron*; nilainya didekati dengan  $1,602 \times 10^{-19}$  C.

### 1.1.8 Sifat kelistrikan bahan

Bahan seperti yang biasa kita jumpai dapat dipandang tersusun dari proton, neutron, dan elektron yang sifat-sifatnya dirangkum dalam Tabel 23-1. Atom mengandung inti kecil padat yang bermuatan positif (yang terdiri dari neutron dan proton) dan dikelilingi oleh awan elektron yang tertarik ke inti akibat gaya elektrik. Kebanyakan gaya yang biasa kita alami seperti gaya gesekan, tekanan fluida, gaya kontak antar permukaan pejal, dan gaya elastik semuanya merupakan manifestasi dari interaksi elektrik antara partikel-partikel bermuatan penyusun atom. Contoh 3 dan 4 memperlihatkan bahwa gaya elektrik adalah jauh lebih besar daripada gravitasi ketika kedua interaksi ini terjadi secara simultan, dan bahwa gaya nuklir itu jauh lebih besar lagi.

### 1.1.9 Muatan itu terkonservasi

Muatan listrik selain terkuantisasi juga terkonservasi. Artinya, muatan netto (dalam jumlahan aljabarnya) dari sistem muatan yang terisolasi tidak akan berubah, tak peduli di situ telah terjadi interaksi apapun.

## 1.2 Contoh Soal

(Soal 24:21)

## 1.3 Latihan

# Bab 2

## Medan Listrik

(ref: Bab 24)

### 2.1 Teori

\*  $\Rightarrow$  Interpretasi medan atas gaya listrik \*  $\Rightarrow$  Definisi medan listrik \*  $\Rightarrow$  Garis-garis gaya \*  $\Rightarrow$  Medan akibat satu atau beberapa muatan titik \*  $\Rightarrow$  Gaya dan percepatan dalam medan listrik \*  $\Rightarrow$  Dipol listrik \*  $\Rightarrow$  Torsi pada dipol listrik \*  $\Rightarrow$  Energi potensial dipol listrik

#### 2.1.1 Interpretasi medan atas gaya listrik

Salah satu cara untuk menerangkan gaya listrik antara dua muatan adalah dengan menganggap setiap muatan menimbulkan medan listrik dalam ruang di sekitarnya. Masing-masing muatan itu kemudian berinteraksi dengan medan yang dihasilkan di tempatnya masing-masing.

#### 2.1.2 Definisi medan listrik

Kita mendefinisikan medan listrik di suatu titik dalam ruang menurut gaya elektrik yang menimpa muatan uji kecil yang ditempatkan di titik itu. Persamaan untuk mendefinisikan ini adalah

$$\mathbf{E} = \mathbf{F}/q_0. \quad (2.1)$$

Medan listrik didefinisikan sebagai limit hasil bagi di atas ketika  $q_0$  mendekati nol bila nilai yang diperoleh dengan Pers. (2.1) berbeda-beda untuk muatan yang berbeda.

### 2.1.3 Garis-garis gaya

Garis-garis gaya merupakan cara yang enak untuk menyatakan medan listrik. Garis tersebut digambar sedemikian hingga garis singgungnya menunjukkan arah medan dan sedemikian hingga jumlah garis per satuan luas penampang lintang yang tegak lurus dengan garis itu sebanding dengan kekuatan medan itu. Jumlah garis yang meninggalkan sebarang partikel bermuatan juga sebanding dengan muatannya. Pasal 24-3 menunjukkan garis-garis medan untuk lembar muatan luas, bola bermuatan, dua muatan sama sejenis, dan dua muatan sama berlawanan.

### 2.1.4 Medan akibat satu atau beberapa muatan titik

Sebarang medan listrik dapat dihitung dengan hukum Coulomb bila diketahui lokasi dan muatan dari partikel bermuatan yang menyebabkannya. Medan akibat satu muatan titik mempunyai magnitude

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (2.2)$$

Arah medan menjauhi muatan bila muatan positif dan menuju muatan bila negatif.

#### Medan akibat beberapa muatan

Medan akibat beberapa muatan titik dihitung dengan menjumlahkan, secara vektor, kontribusi dari masing-masing muatan titik. Ini dinamakan *prinsip superposisi*. Operasi penjumlahan akan berubah menjadi operasi integrasi ( $\int$ ) bila muatan penyebab medan tidak lagi diskret tetapi terdistribusi secara kontinu. Contoh 3, 4, dan 5 mengilustrasikan macam-macam hitungan ini.

### 2.1.5 Gaya dan percepatan dalam medan listrik

Muatan titik dalam medan listrik  $\mathbf{E}$  akan mengalami gaya elektrik

$$\mathbf{F} = \mathbf{E}q \quad (2.3)$$

dan percepatan sesuai dengan hukum Newton ke dua ( $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ ). Contoh 6, 7, dan 8 mengilustrasikan aplikasi prinsip ini untuk partikel bermuatan yang bergerak dalam medan listrik uniform.

### 2.1.6 Dipol listrik

Konfigurasi dua muatan sama besar tetapi berlawanan jenis  $\pm q$  yang terpisah sejauh  $2a$  dinamakan *dipol listrik*. Dipol listrik dapat dijelaskan dalam momen dipol vektor  $\mathbf{p}$  dengan magnitudo  $2aq$  dan arah sejajar dengan garis dari muatan negatif ke positif. Medan akibat dipol listrik dijelaskan dalam Contoh 3 dan Problem 26.

### 2.1.7 Torsi pada dipol listrik

Dipol dalam medan listrik uniform tidak mengalami gaya netto tetapi mengalami torsi  $\tau$  dengan

$$\tau = \mathbf{p} \times \mathbf{E}. \quad (2.4)$$

Torsi ini cenderung membelokkan dipol ke arah sejajar dengan medan.

### 2.1.8 Energi potensial dipol listrik

Energi potensial dipol dalam medan listrik dapat dihitung dengan

$$U = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}. \quad (2.5)$$

## 2.2 Contoh Soal

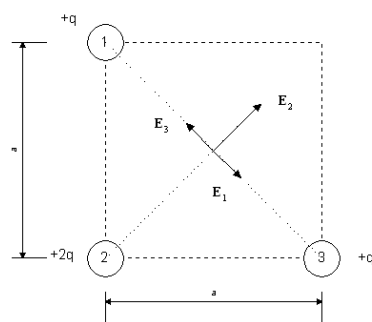
(Soal 24:21)

Hitung medan listrik  $\mathbf{E}$  (ke mana arah dan berapa besarnya) di titik perpotongan diagonal P dari bujur sangkar dalam Gambar 2.1.

Jawab:

Bujur sangkar dengan sisi  $a$  akan mempunyai panjang diagonal  $\sqrt{(a^2 + a^2)} = a\sqrt{2}$ . Titik perpotongan diagonal P akan membagi diagonal sama panjang. Sehingga jarak dari P ke muatan 1 dan P ke muatan 3 adalah sama panjang, yakni  $(1/2)a\sqrt{2}$ . Medan listrik akibat muatan 1 ( $\mathbf{E}_1$ ) dan akibat muatan 2 ( $\mathbf{E}_2$ ) berkekuatan sama besar tetapi arahnya berlawanan. Sehingga resultan dari  $\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = 0$ . Kuat medan listrik  $\mathbf{E}$  di titik P adalah hasil superposisi (penjumlahan vektor) dari  $\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 = 0 + \mathbf{E}_3 = \mathbf{E}_3$ . dengan  $E_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2q}{(\frac{1}{2}a\sqrt{2})^2} = \frac{q}{\pi\epsilon_0 a^2}$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 = 0 + \mathbf{E}_3 = \mathbf{E}_3.$$



Gambar 24-18. Soal 21

Gambar 2.1: Mencari  $\mathbf{E}$  akibat 3 muatan titik.

Sehingga  $E = \frac{q}{\pi\epsilon_0 a^2}$

Jadi besar medan listrik di perpotongan diagonal bujursangkar P adalah  $\frac{q}{\pi\epsilon_0 a^2}$  dengan arah seperti arah  $\mathbf{E}_2$  (lihat gambar, yakni menjauhi muatan 2 menyamping ke kiri atas dengan sudut  $45^\circ$  dari horizontal).

## 2.3 Latihan

# Bab 3

## Hukum Gauss

(ref: Bab 25)

### 3.1 Teori

#### 3.1.1 Hukum Gauss

Hukum Gauss dan hukum Coulomb, meski dinyatakan dalam bentuk yang berbeda, keduanya merupakan cara yang ekuivalen untuk menjelaskan hubungan antara muatan dan medan listrik. Hukum Gauss adalah

$$\epsilon_0 \Phi_E = q \quad (3.1)$$

dengan  $\Phi_E$  adalah flux medan listrik melalui permukaan tertutup khayal yang dapat dibuat dalam medan ini. Muatan  $q$  di atas adalah muatan yang ada di dalam permukaan Gauss saja; muatan di luar tidak ikut memberi kontribusi terbentuknya flux dan tidak diperhitungkan dalam penerapan persamaan di atas.

#### 3.1.2 Flux Medan Listrik

Flux  $\Phi_E$  dapat dihitung dari

$$\Phi_E = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (3.2)$$

Pembahasan yang berhubungan dengan Gambar 25-3 menunjukkan bagaimana perhitungan ini dapat dilakukan dalam kasus umum dan Contoh 1 menerangkan kasus khusus sederhana. Gambar 25-2 secara kualitatif memperlihatkan empat kasus sederhana penerapan hukum Gauss.



### 3.1.3 Hukum Coulomb dan Hukum Gauss

Hukum Coulomb dengan mudah dapat dijabarkan dari hukum Gauss, caranya lihat Pasal 25-5. Uji eksperimen yang saksama atas hukum Gauss, juga hukum Coulomb, dijelaskan dalam Pasal 25-7. Seperti diperlihatkan Tabel 25-1, eksponen dari  $r$  dalam hukum Coulomb sekarang diketahui tepat '2' dalam ketakpastian eksperimental  $3 \times 10^{-16}$ .

Dengan menggunakan hukum Gauss, dalam beberapa kasus dengan memanfaatkan sifat simetri, bisa dijabarkan persamaan-persamaan penting. Diantaranya adalah:

### 3.1.4 Muatan pada Konduktor

Kelebihan muatan pada konduktor yang terisolasi (dalam ekuilibrium) seluruhnya akan berada di luar permukaan. (Pasal 25-6)

### 3.1.5 Medan di luar muatan sferis (bola)

Medan listrik di luar sebarang distribusi muatan sferis akan selalu mengarah radial dan dengan magnitudo

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (3.3)$$

dengan  $q$  adalah muatan total.

### 3.1.6 Medan di dalam muatan sferis

Medan listrik di dalam sebarang distribusi muatan sferis selalu mengarah radial dan dengan magnitudo

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q'}{r^2} \quad (3.4)$$

dengan  $q'$  adalah bagian dari  $q$  yang tercakup dalam bola dengan radius  $r$  dengan pusat sumbu di pusat simetri.

### 3.1.7 Medan di dalam muatan sferis homogen

Medan listrik di dalam muatan sferis homogen selalu mengarah radial dan dengan magnitudo

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qr}{R^3} \quad (3.5)$$

### 3.1.8 Medan akibat muatan garis tak hingga

Medan listrik akibat muatan garis tak hingga selalu mengarah tegak lurus ke garis itu dan dengan magnitude

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (3.6)$$

### 3.1.9 Medan akibat muatan bidang tak hingga

Medan listrik akibat muatan bidang tak hingga selalu mengarah tegak lurus bidang itu dan dengan magnitude

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (3.7)$$

### 3.1.10 Medan di dekat konduktor bermuatan

Medan listrik di dekat konduktor bermuatan, yang muatannya dalam kondisi ekuilibrium, selalu mengarah tegak lurus permukaan dan dengan besar

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (3.8)$$

## 3.2 Contoh Soal

## 3.3 Latihan

# Bab 4

## Potensial Listrik

(ref: Bab 26)

### 4.1 Teori

#### 4.1.1 Beda Potensial Listrik

Bila gaya eksternal melakukan usaha  $W_{ab}$  dalam memindahkan muatan uji  $q_0$  dari titik  $A$  ke titik  $B$  dalam medan listrik, maka beda potensial listrik antara kedua titik ini dapat dihitung dengan rumus

$$V_B - V_A = \frac{W_{AB}}{q_0} \quad (4.1)$$

$W_{ab}$  (dan juga  $V_B - V_A$ ) nilainya tidak tergantung pada lintasan yang diambil; lihat Gambar 26-1.

#### 4.1.2 Potensial Listrik $V$ dan satuan Volt

Titik  $A$  di atas sering dianggap sebagai titik acuan universal, yang terletak di tak hingga, dan  $V_A$  diberi nilai sebarang nol. Titik  $B$  karenanya merupakan titik medan umum, yang potensial listriknya adalah  $V_B$  (atau  $V$  saja; lihat pers. 26-2). Satuan SI untuk potensial listrik adalah volt, yang didefinisikan sebagai 1 joule/coulomb.

### 4.1.3 Permukaan Ekuipotensial

Permukaan ekuipotensial merupakan tempat kedudukan titik-titik dengan potensial listrik yang sama. Usaha yang dilakukan untuk memindahkan muatan dari satu permukaan ekuipotensial ke yang lain tidak tergantung pada letak titik awal dan akhir pada permukaan ini atau pada sifat lintasan yang menghubungkannya; lihat Gambar 26-2. Garis-garis gaya yang berhubungan dengan medan listrik selalu tegak lurus dengan keluarga permukaan ekuipotensial ini; lihat Gambar 26-15.

### 4.1.4 Menghitung V dari E

Bila medan listrik  $E$  diketahui di semua area tertentu, beda potensial antara dua sebarang titik dalam area itu dihitung dengan

$$V_B - V_A = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (4.2)$$

Di sini integral garis dilakukan sepanjang sebarang lintasan yang menghubungkan  $A$  dan  $B$ . Penerapan persamaan ini dapat dilihat di contoh 1 dan 2.

### 4.1.5 Menghitung E dari V

Sebaliknya, bila potensial  $V(x, y, z)$  diketahui di semua daerah tertentu, komponen  $E$  dapat ditemukan dengan pendiferensialan, atau

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y}, \quad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad (4.3)$$

Persamaan 4.2 dan 4.3 merupakan relasi timbal balik yang menghubungkan  $E$  dan  $V$ .

### 4.1.6 Potensial akibat muatan titik atau distribusi muatan

Bila titik  $A$  dalam pers. 4.2 dipilih berada di tak hingga dan bila kita menentukan  $V_A = 0$ , potensial akibat satu muatan titik dapat dihitung (dari pers. 4.2 dan pers. 24-4) dengan

$$V(= V_B) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}. \quad (4.4)$$

Untuk distribusi muatan kontinyu ini dapat diperluas menjadi

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r} \quad (4.5)$$

dengan integral dikerjakan pada seluruh muatan. Lihat Contoh 3, 4, 5, dan 6.

### 4.1.7 Dipol Listrik

Dua muatan sama besar tapi berlawanan  $\pm q$  yang terpisah sejauh  $2a$  akan membentuk dipol listrik. Momen dipolnya  $\mathbf{p}$  menunjuk dari muatan negatif ke positif dan mempunyai besar  $2qa$ . Potensial akibat dipol adalah

$$V(r, \theta) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p \cos \theta}{r^2} \quad (\text{untuk } r \gg 2a) \quad (4.6)$$

dengan  $r$  dan  $\theta$  didefinisikan dari Gambar 26-9. Banyak molekul mempunyai momen dipol intrinsik (Gambar 26-11). Seperti diperlihatkan Gambar 26-12, momen dipol dapat juga diimbaskan dari medan listrik eksternal.

### 4.1.8 Energi potensial listrik

Energi potensial listrik dari sistem muatan titik didefinisikan sebagai usaha yang diperlukan untuk merakit sistem itu, mulai dari muatan diam dan berada di tak hingga satu sama lain. Untuk dua muatan, energi dihitung dengan rumus

$$U(= W) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}. \quad (4.7)$$

Pemakaian rumus lihat Contoh 7 dan 8.

### 4.1.9 Konduktor Bermuatan dan Generator Elektrostatik

Dari Pasal 25-6 diperlihatkan bahwa kelebihan muatan yang ditempatkan pada konduktor (bila sudah ekuilibrium) akan berada dipermukaan luarnya. Dengan kata lain kita katakan bahwa dalam pendistribusian muatan, muatan itu menjadikan seluruh konduktor, termasuk kedua permukaan dan titik-titik di dalamnya, menuju ke potensial yang uniform. Gambar 26-17 menunjukkan  $V(r)$ —dan juga  $E(r)$ — untuk bola penghantar bermuatan atau kulit sferis. Pemikiran seperti ini bisa untuk menjelaskan cara kerja generator elektrostatik. Contoh 10 dan Gambar 26-18 menunjukkan prinsip kerjanya. Jelas bahwa bila antara dua konduktor dihubungkan dalam gambar itu, muatan  $q$  pada bola dalam *seluruhnya* akan berpindah ke kulit luar, tak peduli berapapun jumlah muatan yang sudah ada di luar.

## **4.2 Contoh Soal**

## **4.3 Soal Latihan**

© 2001 Nurkhamid <http://www.nurid.net> paknurid@nurid.net

# Bab 5

## Kapasitor dan Dielektrik

(ref: Bab 27)

### 5.1 Teori

#### 5.1.1 Kapasitor dan kapasitansi

Kapasitor terbentuk atas dua (pelat) konduktor terisolasi dengan masing-masing mengandung muatan sama banyak tapi berlawanan  $+q$  dan  $-q$ . Kapasitansi didefinisikan dari

$$q = CV \tag{5.1}$$

dengan  $V$  adalah beda potensial antara dua pelat. Satuan SI untuk kapasitansi adalah *farad* (1 farad = 1 coulomb/volt).

#### 5.1.2 Kapasitor pelat paralel

Kapasitor pelat paralel tersusun atas 2 pelat paralel dengan luas  $A$  dan jarak antar pelat  $d$ . Dalam ruang hampa, dengan penjabaran menggunakan hukum Gauss kapasitansinya adalah

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}; \tag{5.2}$$

lihat Contoh 1.

### 5.1.3 Kapasitor silindris

Kapasitor silindris terdiri atas dua silinder sesumbu yang panjang dengan panjang  $l$ . Bila jejari dalam dan luar adalah  $a$  dan  $b$ , kapasitansi dihitung dengan

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln(b/a)}, \quad (5.3)$$

lihat Contoh 2.

### 5.1.4 Kapasitor bola

Kapasitor bola tersusun atas pelat dalam dan luar dengan jejari  $a$  dan  $b$ ; kapasitansinya (lihat Soal 22) adalah

$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{ab}{(b-a)}. \quad (5.4)$$

Bila  $b \rightarrow \infty$  dan  $a = R$ , seperti dalam Contoh 3, maka kita dapatkan kapasitansi bola terisolasi, atau

$$C = 4\pi\epsilon_0 R. \quad (5.5)$$

### 5.1.5 Kapasitor seri dan paralel

Kapasitansi ekuivalen  $C_{eq}$  dari gabungan beberapa kapasitor yang dirangkai seri (lihat Contoh 4) dan paralel (lihat Soal 3) adalah

$$\text{seri : } \frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \dots \quad (5.6)$$

$$\text{paralel : } C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 \dots \quad (5.7)$$

### 5.1.6 Energi dan kerapatan energi

Energi potensial  $U$  yang tersimpan di dalam kapasitor dengan rumus

$$U = \frac{1}{2}CV^2, \quad (5.8)$$

didefinisikan sebagai usaha yang diperlukan untuk mengisi muatan. Energi ini enaknya dipandang sebagai energi yang tersimpan di dalam medan listrik  $\mathbf{E}$  yang



ada di kapasitor itu. Dengan perluasan ini secara umum kita dapat mengasosiasikan energi yang tersimpan dengan medan listrik, tanpa mempedulikan asal mula medan listriknya. Kerapatan energi  $u$  dirumuskan sebagai

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2, \quad (5.9)$$

dengan asumsi  $\mathbf{E}$  ada di ruang hampa.

### 5.1.7 Kapasitansi dengan dielektrik

Gambar 27-6a, b menunjukkan ruang di antara pelat-pelat kapasitor yang sepenuhnya diisi dengan bahan dielektrik. Eksperimen menunjukkan bahwa dielektrik menaikkan kapasitansi  $C$  sebesar faktor  $\kappa$ . Faktor ini merupakan karakteristik bahan (lihat Tabel 27-1) dan dinamakan *konstanta dielektrik*.

### 5.1.8 Energi dan kerapatan energi dengan dielektrik

Untuk beda potensial tetap, kenaikan kapasitansi yang disebabkan oleh penambahan dielektrik akan berarti pula (lihat Gbr. 27-6a dan Pers. 5.8) bahwa energi  $U$  yang tersimpan di kapasitor juga naik dengan faktor  $\kappa$ . Diperluas, Pers. 5.9 untuk kerapatan energi akan menghasilkan generalisasi

$$u = \frac{1}{2} \kappa \epsilon_0 E^2. \quad (5.10)$$

Pengaruh penambahan dielektrik ini dapat dipahami secara fisis berdasarkan atas kerja medan listrik pada dipol listrik permanen atau terimbas dalam batang dielektrik. Seperti digambarkan dalam Gbr. 27-8, hasilnya berupa terbentuknya muatan-muatan permukaan imbas, yang mengakibatkan pelemahan medan di dalam batang dielektrik.

### 5.1.9 Hukum Gauss dalam dielektrik

Ketika ada dielektrik, hukum Gauss dapat dibawa ke bentuk umum sebagai

$$\epsilon_0 \oint (k\mathbf{E}) \cdot d\mathbf{S} = q. \quad (5.11)$$

Di sini  $q$  hanya meliputi muatan bebas saja, yakni muatan permukaan akibat imbas yang ikut diperhitungkan dengan dimasukkannya  $\kappa$  di dalam integral. Contoh 8 menerapkan persamaan ini ke kasus khusus yang penting.

## **5.2 Contoh Soal**

## **5.3 Soal Latihan**

© 2001 Nurkhamid <http://www.nurid.net> paknurid@nurid.net

# Bab 6

## Arus Listrik dan Hambatan

(ref: Bab 28)

### 6.1 Teori

#### 6.1.1 Arus dan rapat arus

##### Arus $i$

Arus listrik  $i$  dalam konduktor didefinisikan sebagai

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (6.1)$$

Di sini  $dq$  adalah jumlah muatan yang lewat dalam waktu  $dt$  melalui permukaan hipotetis yang memotong konduktor. Bila arus *steady*, nilainya akan sama di semua penampang lintang.

##### Rapat arus $\mathbf{j}$

Arus (skalar) terkait dengan rapat arus  $\mathbf{j}$  (vektor) dengan hubungan

$$i = \int \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S} \quad (6.2)$$

dengan  $d\mathbf{S}$  adalah elemen luas dan integral dilakukan di seluruh permukaan yang memotong penampang lintang konduktor.

### Konvensi tanda

Arah  $\mathbf{j}$  pada sebarang titik adalah seperti arah gerak muatan positif bila muatan itu ditempatkan di titik itu; lihat Gbr. 28-1 dan Contoh 1. Kita sering melabeli arus  $i$  dengan panah untuk mengingatkan kita akan arah vektor rapat arus penyebabnya.

### Laju hanyut rerata pembawa muatan

Ketika medan listrik  $\mathbf{E}$  diberikan dalam konduktor, pembawa muatan (diasumsikan positif) akan mendapat laju hanyut  $\mathbf{v}_d$  ke arah  $\mathbf{E}$ , yang terkait dengan rapat arus melalui rumus

$$\mathbf{j} = (ne)\mathbf{v}_d \quad (6.3)$$

dengan  $(ne)$  adalah rapat muatan.

## 6.1.2 Hambatan konduktor

Hambatan  $R$  antara dua sebarang permukaan ekuipotensial konduktor didefinisikan dari

$$R = V/i \quad (6.4)$$

dengan  $V$  adalah beda potensial antara kedua permukaan dan  $i$  adalah arus. Satuan SI untuk  $R$  adalah ohm ( $= 1 \text{ V/A}$ ); disingkat  $\Omega$ .

## 6.1.3 Resistivitas bahan

Persamaan serupa mendefinisikan resistivitas bahan  $\rho$ , yakni

$$\rho = E/j \quad (6.5)$$

dengan  $E$  adalah medan listrik; lihat Tabel 28-1. Untuk konduktor silindris kita dapat menghitung  $R$  dari

$$R = \rho l/A; \quad (6.6)$$

lihat Contoh 3.

### Perubahan $\rho$ terhadap suhu

Resistivitas  $\rho$  bahan pada umumnya berubah terhadap suhu. Kebanyakan, termasuk logam, perubahan ini cukup didekati dengan hubungan linear empirik dengan persamaan

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)]. \quad (6.7)$$

dengan  $\rho_0$  adalah resistivitas bahan pada suhu acuan  $T_0$ ,  $\alpha$  adalah koefisien suhu rerata resistivitas untuk kisaran suhu tertentu; lihat Tabel 28-1 dan Gbr. 28-2.

### 6.1.4 Hukum Ohm

Ditinjau hukum Ohm untuk konduktor dan bahan.

#### Konduktor

Konduktor tertentu memenuhi hukum Ohm bila resistansi  $R$  tidak tergantung pada beda potensial terpasang  $V$ . Artinya, ada hubungan antara  $V$  dan  $i$  dengan persamaan  $V = iR$ ; bandingkan Gbr. 28-4 dan 28-5.

#### Bahan

*Bahan* tertentu memenuhi hukum Ohm bila resistivitasnya tidak tergantung pada medan listrik terpasang  $E$ . Ini mengisyaratkan adanya hubungan linear antara  $E$  dan rapat arus  $j$  dengan persamaan

$$E = \rho j. \quad (6.8)$$

### 6.1.5 Resistivitas logam

Dengan memperlakukan elektron konduksi dalam logam seperti molekul-molekul gas, kita bisa menjabarkan persamaan untuk resistivitas logam, berikut ini

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau}. \quad (6.9)$$

Di sini  $n$  adalah jumlah elektron per satuan volume dan  $\tau$  adalah waktu rerata antar tumbukan elektron dengan susunan (kisi-kisi) inti-inti ion. Pembahasan yang didasarkan atas Gbr. 28-6 menunjukkan bahwa  $\tau$  tidak tergantung  $E$  dan karenanya bisa menjelaskan dipenuhinya hukum Ohm oleh logam; lihat Contoh 4.

### 6.1.6 Daya

Daya  $P$  atau laju transfer energi dalam peranti elektrik dengan beda potensial  $V$  dibuat konstan adalah

$$P = iV. \quad (6.10)$$

### 6.1.7 Hukum Joule

Bila peranti itu berupa resistor, Pers. 6.10 dapat ditulis sebagai

$$P = i^2 R = V^2/R, \quad (6.11)$$

dua bentuk hukum Joule yang ekuivalen; lihat Contoh 5. Dalam resistor, energi potensial listrik ditransfer ke kisi-kisi dengan menghanyutkan pembawa muatan, yang mewujudkan sebagai energi termal internal.

## 6.2 Contoh Soal

## 6.3 Soal Latihan

© 2001 Nurkhamid <http://kuliah.nurid.net> paknurid@nurid.net

Dokumen ini diproduksi dengan  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ —sebagai pengalaman pertama mengolah dokumen dengan  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ .