

MEDAN ELEKTROMAGNETIK

Beberapa hal terkait fenomena medan magnet dan medan listrik menjadi salah satu pembahasan dalam bidang teknik elektro. Buku ini berisi materi tentang medan listrik dan medan magnet. Diantaranya tentang Hukum Coulomb yang membahas tentang teori medan listrik serta cara menghitung besar gaya listrik pada partikel bermuatan listrik, Gaya Lorentz, Fluks Listrik, dan beberapa bab terkait. Selain membahas tentang teori, dalam buku ini juga disertai pembahasan secara matematis, lengkap dengan beberapa contoh soal serta soal-soal evaluasi sebagai bahan latihan.



Penerbit UNIPMA Press
Universitas PGRI Madiun
Jl. Setia Budi No. 85 Madiun, Jawa Timur 63118
E-Mail: upress@unipma.ac.id
Website: kww.unipma.ac.id

ISBN 978-623-8095-25-4

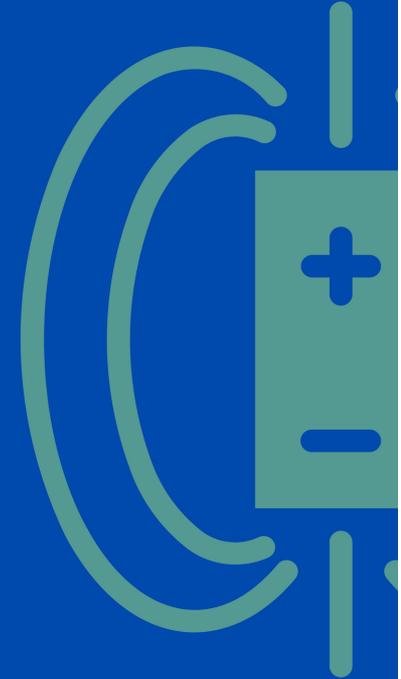


MEDAN ELEKTROMAGNETIK

Ihtiar Prastyaningrum
Nurulita Imansari



MEDAN ELEKTROMAGNETIK



*Ihtiar Prastyaningrum
Nurulita Imansari*

Medan Elektromagnetik

Ihtiari Prastyaningrum

Nurulita Imansari



UNIPMAPress

WE GOT IT

Medan Elektromagnetik

Penulis:

Ihtiari Prastyaningrum
Nurulita Imansari

Editor:

Umi Kholifah

Perancang Sampul:

Rizky Dwi Wisesa

Penata Letak:

Dodik Krisdianto

Cetakan Pertama, Maret 2023

Diterbitkan Oleh:

UNIPMA Press Universitas PGRI Madiun

Jl. Setiabudi No. 85 Madiun Jawa Timur 63118

E-Mail: upress@unipma.ac.id

Website: kwu.unipma.ac.id

Anggota IKAPI: No. 207/Anggota Luar Biasa/JTI/2018

ISBN: 978-623-8095-25-4

Hak Cipta dilindungi oleh Undang-Undang

All right reserved

PRAKATA

Medan Elektromagnetik merupakan salah satu hal yang banyak berkaitan dengan perangkat elektro. Bahasan mengenai medan elektromagnetik sangat luas dan hingga saat ini masih terus dikaji dan diteliti. Sebagian besar perangkat elektro arus kuat menggunakan medan elektromagnetik sebagai dasar kerjanya.

Buku ini membahas tentang dasar medan elektromagnetik. Ilmu dasar tentang medan elektromagnetik nantinya dapat dikembangkan lebih kepada medan elektromagnetik terapan. Buku ini dapat dipakai oleh mahasiswa teknik. Targetnya diperuntukan khususnya bagi mahasiswa yang mempelajari perangkat elektronik arus kuat.

Buku ini diharapkan nantinya dapat memberikan sumbangsih ilmu pengetahuan dalam dunia teknik. Khususnya teknik elektro arus kuat. Banyak kekurangan dalam buku ini, oleh karena itu kami sebagai penulis mohon kritik dan saran dari pembaca demi perbaikan buku ini.

Salam,
Penyusun

DAFTAR ISI

Halaman Sampul	i
Halaman Redaksi	ii
Prakata	iii
Daftar Isi	iv
BAB 1. Hukum Coulomb dan Medan Listrik	
Sejarah Elektromagnetik	1
Muatan Listrik.....	2
Hukum Coulomb	5
Evaluasi	17
BAB 2. Medan Magnet di Sekitar Arus Listrik	
Percobaan Oersted.....	20
Hukum Biot Savart.....	22
Evaluasi	37
BAB 3. Gaya Lorentz	
Gaya Lorentz pada Kawat Berarus Listrik	39
Arah Gaya Lorentz.....	40
Gaya Lorentz pada Kawat Sejajar Berarus Listrik	41
Gaya Lorentz pada muatan yang Bergerak dalam Medan Magnet.....	43
Evaluasi	51
BAB 4. Fluks Listrik dan Hukum Gauss	
Medan Listrik.....	54
Gerak Partikel Bermuatan dalam Medan Listrik	56
Fluks Listrik	56
Hukum Gauss	58
Teorema Divergensi	59

Hubungan antara Kerapatan Fluks dan Kuat Medan Listrik	61
Pemakaian Hukum Gauss	62
Intensitas Medan Listrik oleh Muatan Titik	63
Intensitas Medan Listrik oleh Muatan Garis	63
Kabel Koaksial	64
Evaluasi.....	70

BAB 5. Potensial Listrik

Energi Potensial Listrik	73
Potensial Listrik akibat Muatan titik Q	76
Potensial Dipole Listrik	77
Potensial akibat Muatan Terdistribusi	78
Konsep Potensial Listrik dalam Kapasitor	78
Potensial Listrik dari Cincin Bermuatan	79
Potensial Listrik dari Cakram Bermuatan	80
Potensial Listrik dari Bola Kosong Bermuatan	82
Evaluasi.....	90

BAB 6. Kapasitor Dielektrika

Kapasitansi.....	93
Konsep Potensial Listrik dalam Kapasitor	95
Rangkaian Kapasitor	95
Energi Dalam Medan Listrik	98
Dielektrika	99
Evaluasi.....	104

1

Hukum Coulomb dan Muatan Listrik

1.1 Sejarah Elektromagnetik

Pengetahuan mengenai listrik dan magnet pada awalnya dibicarakan secara terpisah. Ilmu ini bermula dari pengamatan yang dilakukan oleh Thales yang merupakan filsuf pertama dari Miletos pada 600 tahun sebelum Masehi. Menurut sejarah, Thales adalah orang pertama yang menaruh perhatian pada sifat biji besi, dimana dia menemukan adanya batuan bermuatan, yang kemudian pada masa setelahnya sering disebut dalam beberap tulisan kuno. Batuan bermuatan tersebut ternyata dapat menarik potongan jerami kecil.

Kemudian Pada tahun 1820, Hans Christian Oesterd menemukan bahwa kawat yang dialiri arus listrik dapat menolak

jarum kompas. Hal ini menunjukkan bahwa di sekitar kawat berarus timbul medan magnetik.

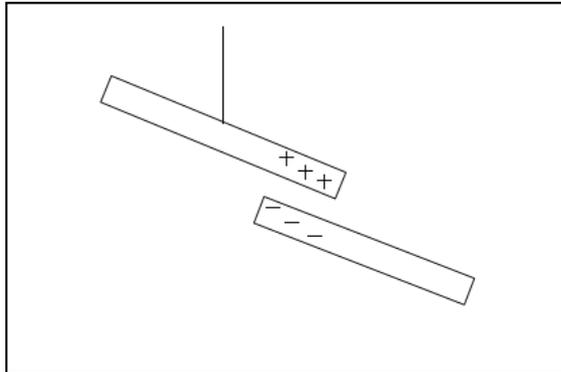
Selanjutnya, Michael Faraday pada tahun 1821, membuat suatu penemuan penting. Dua tahun sebelumnya Oersted telah menemukan bahwa jarum magnet kompas dapat menyimpang jika arus listrik dialirkan dalam kawat yang letaknya tidak jauh. Berdasarkan penemuan Oersted, Michael Faraday menyimpulkan bahwa, jika magnet didekatkan, yang akan bergerak adalah kawat yang dialiri listrik. Bekerja atas dasar dugaan ini, Michael Faraday berhasil membuat suatu skema yang jelas dimana kawat akan terus-menerus berputar berdekatan dengan magnet sepanjang arus listrik dialirkan ke kawat. Sesungguhnya penemuan ini Faraday merupakan motor listrik pertama, suatu skema pertama penggunaan arus listrik untuk membuat sesuatu benda bergerak. Meskipun masih sangat primitif, penemuan Michael Faraday ini merupakan awal mula dari semua motor listrik yang digunakan dunia saat ini.

Pengetahuan tentang listrik dan magnetik sekarang ini dikenal dengan elektromagnetisme. Dimana setelah Faraday, banyak peneliti lain yang mengembangkan elektromagnetik. Beberapa orang yang diantaranya adalah James Clerk Maxwell (1831-1879), Oliver Heaviside (1850-1925), H. A. Lorentz (1853-1928), dan M. Heinrich Hertz (1857-1894).

1.2 Muatan Listrik

Di alam terdapat dua jenis muatan listrik, yaitu muatan positif dan muatan negatif. Suatu benda dikatakan bermuatan listrik jika benda tersebut mempunyai kelebihan sejumlah elektron atau proton. Benda yang kelebihan sejumlah elektron akan bermuatan negatif dan yang kelebihan sejumlah proton dikatakan bermuatan positif. Untuk mengetahui kedua jenis muatan ini dapat diketahui secara sederhana menggunakan dua jenis batang seperti ditunjukkan Gambar 1.1.

Batang pertama yang terbuat dari kaca digantungkan dengan benang kemudian digosokkan dengan kain sutera sehingga batang kaca menjadi bermuatan positif. Jika ujung batang kedua terbuat dari kaca lalu sama-sama digosokkan dengan sutera lalu didekatkan ke ujung batang pertama maka ujung batang yang digantung akan bergerak menjauh.



Gambar 1.1. Batang kaca digosokkan ke kain sutra

Tetapi jika batang kedua terbuat dari plastik yang digosokkan dengan kain wol, maka ujung batang yang digantung akan bergerak mendekat. Kedua kejadian di atas juga terjadi jika batang pertama terbuat dari plastik dan digosokkan pada kain wol. Jika batang pertama terbuat dari plastik dan digosokkan pada kain wol, dan batang kedua terbuat dari plastik dan digosokkan pada kain wol, maka ujung batang pertama akan bergerak menjauh. Penjelasan lebih ringkasnya dapat dilihat pada Tabel 1.1:

Jenis Batang		Batang 1	
		Kaca, Sutra	Plastik, Wol
Batang 2	Kaca, Sutra	<ul style="list-style-type: none"> • Batang 1 akan bermuatan positif • Jika batang 2 didekatkan maka ujung batang akan bergerak menjauh 	<ul style="list-style-type: none"> • Batang 1 akan bermuatan negatif • Jika batang 2 didekatkan maka ujung batang akan bergerak mendekat
	Plastik, Wol	<ul style="list-style-type: none"> • Batang 1 akan bermuatan positif 	<ul style="list-style-type: none"> • Batang 1 akan bermuatan negatif

		<ul style="list-style-type: none"> • Jika batang 2 didekatkan maka ujung batang akan bergerak mendekat 	<ul style="list-style-type: none"> • Jika batang 2 didekatkan maka ujung batang akan bergerak menjauh
--	--	---	--

Tabel 1.1 Fenomena yang terjadi pada batang bermuatan listrik

Kesimpulan yang dapat diambil dari kejadian pada kedua batang tersebut adalah, dimana muatan yang sejenis akan tolak menolak. Sedangkan muatan yang berbeda jenis akan tarik-menarik.

Muatan yang pada kaca dan plastik timbul karena proses penggosokan. Jika batang kaca digosok dengan kain sutra, elektron-elektron dari kaca akan berpindah menuju kain sutra. Kaca menjadi bermuatan positif, karena kekurangan elektron. Kain sutra yang mendapat tambahan elektron akan bermuatan negatif. Berbeda dengan plastik yang digosok kain wol. Kain wol dapat bermuatan positif jika digunakan untuk menggosok penggaris plastik, sedangkan penggaris plastik akan bermuatan negatif. Pada awalnya kondisi kedua muatan adalah netral, namun proses penggosokan akan membuat sebagian kecil muatan berpindah. Jenis muatan yang dihasilkan bergantung jenis benda yang digosok dan jenis benda yang digunakan untuk menggosok.

Jumlah kelebihan muatan positif atau negatif biasanya dinyatakan dengan menggunakan huruf q atau Q . Dimana dari hasil penelitian (tetes minyak milikan) menunjukkan bahwa setiap muatan Q besar atau kecil, positif atau negatif adalah merupakan kelipatan dari:

$$e = 1,602 \times 10^{-19} C$$

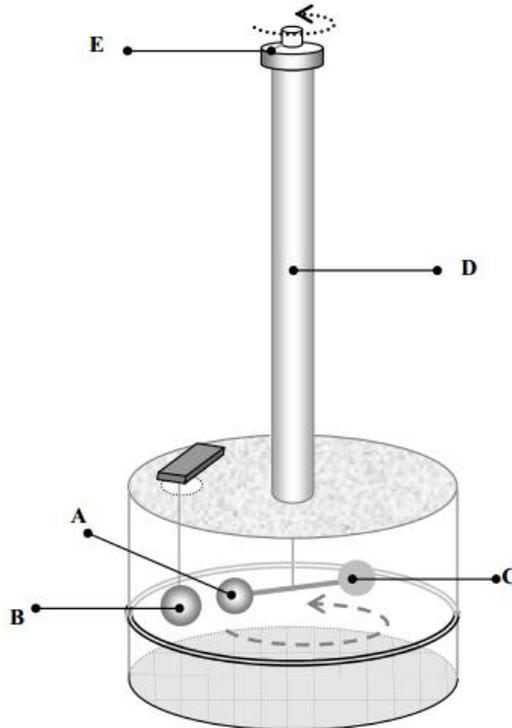
Di sini e adalah muatan untuk satu elektron dan Coulomb (C) adalah satuan muatan listrik.

Penamaan muatan positif dan negatif dilakukan oleh Benjamin Franklin (1706- 1790) untuk membedakan muatan yang terjadi pada kaca dan plastik. Jadi dari percobaan yang sederhana di atas dapat dikatakan bahwa muatan sejenis tolak-menolak dan muatan berlainan jenis tarik-menarik. Efek kelistrikan di atas tidak hanya terjadi pada kaca dan plastik, hal inipun terjadi pada bahan-bahan lain. Untuk

menentukan jenis muatan yang timbul pada suatu bahan, kaca dan plastik digunakan sebagai bahan perbandingan.

1.3 Hukum Coulomb

Charles Agustin Coulomb (1736-1806) mengukur secara kuantitatif besar gaya tolak dan gaya tarik yang terjadi antara dua buah muatan. Coulomb menggunakan alat yang disebut neraca puntir (Gambar 1.2) untuk melakukan percobaan tersebut.



Gambar 1.2. Neraca Puntir Coulomb

Coulomb menggunakan neraca puntir atau “*Torsion Balance*” (seperti yang ditunjukkan Gambar 1.2) pada penelitiannya. Torsion Balance terdiri dari dua bola bermuatan A dan B. Bola A dapat berputar dan memuntir benang serat, bola B merupakan bola yang tidak bisa bergerak, sedangkan C merupakan pengimbang bola A.

Gaya elektrostatis timbul ketika bola bermuatan B mendekati muatan A. Jika muatannya sejenis muncul gaya elektrostatis sehingga batang A-C dapat berputar. Besarnya gaya elektrostatis sebanding dengan putaran dari pasangan bola AC. Putaran ini, melalui serat (fiber) ringan D yang terukur melalui semacam busur E. Ketika muatan B diperbesar dengan dengan cara memberi muatan tambahan atau diperkecil dengan dengan cara mengalirkan muatannya ke tanah, Coulomb mengamati bahwa (dengan melihat skala di E) puntiran menjadi besar ketika muatan ditambah dan menjadi kecil ketika muatan dikurangi. Hal ini menunjukkan bahwa gaya elektrostatis sebanding dengan besar masing-masing muatan. Sehingga Coulomb merumuskan bahwa :

$$F \approx q_1 q_2 \tag{1}$$

Selanjutnya ketika Coulomb mengatur jarak antar muatan A atau B, mengamati bahwa puntiran menjadi besar ketika jaraknya dekat dan menjadi kecil ketika jaraknya lebih jauh dan menyimpulkan bahwa gaya elektrostatis ini berbanding terbalik dengan kuadrat jarak.

$$F \approx \frac{1}{r^2} \tag{2}$$

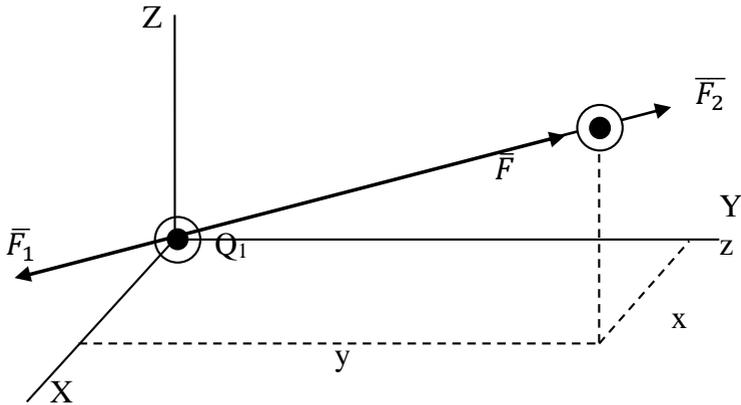
Dari percobaan Coulomb dapatlah disimpulkan bahwa : : AB Q AQ B r F \propto yang berarti gaya elektrostatis sebanding dengan masing-masing muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya. Untuk membuat rumusan ini menjadi eksak, artinya mengubah tanda sebanding (\propto) dengan tanda =, maka diperlukan sebuah konstanta, katakanlah k di mana :

Kedua pernyataan Coulomb mengenai besarnya gaya tolak-menolak dan gaya tarik-menarik tersebut dimana besar kedua gaya tersebut berbanding terbalik dengan kuadrat jarak dan sebanding dengan besar muatan yang berinteraksi dikenal dengan Hukum Coulomb. Dimana dinyatakan dengan :

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2} \tag{3}$$

Besar gaya tarik atau gaya tolak antara dua muatan listrik sebanding dengan muatan-muatannya dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan.

Persamaan (3) dapat disisipi sebuah konstanta. Konstanta tersebut merupakan medium yang berupa ruang vakum atau udara. Kedua muatan yang saling berinteraksi tersebut dianggap sebagai muatan titik (*point charge*). Maksudnya partikel tersebut bermuatan tetapi tidak bermasa. Kesimpulan hasil pengamatannya dirumuskan dalam satu formula yang terkenal sebagai Hukum Coulomb:



Gambar 1.3. Dua muatan yang terpisah sejauh r

Gambar 1.3 menunjukkan dua muatan titik Q_1 dan Q_2 terpisah pada jarak r dengan Q_1 terletak di pusat salib sumbu XYZ . Hukum Coulomb menyatakan bahwa gaya elektrostatis pada muatan Q_2 akibat muatan Q_1 adalah :

$$\vec{F}_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \hat{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^3} \vec{r} \quad (4)$$

dan besarnya

$$F_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \hat{r} \quad (5)$$

Disini $\vec{r} = r \hat{r} = x \hat{i} + y \hat{j} + z \hat{k}$ adalah vektor perpindahan dari Q_1 ke Q_2 sehingga gaya elektrostatika pada muatan Q_1 akibat muatan Q_2 adalah sebesar $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$. Sedangkan nilai $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ yang diperoleh dari hasil percobaan adalah sebesar $8,98742 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$ atau untuk menyederhanakan sebuah perhitungan, nilai tersebut dapat dibulatkan menjadi $9 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$ dan dinyatakan sebagai nilai konstanta, yang biasanya dinotasikan dengan k . Dengan demikian persamaan (5) dapat dituliskan kembali menjadi

$$F_2 = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \hat{r} \quad (6)$$

Dengan

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

Dimana $\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{Nm}^2$ yang merupakan permitivitas ruang hampa.

Contoh Soal 1.1

Tentukan besar gaya elektrostatik pada elektron atom hidrogen yang di akibatkan oleh proton tunggal intinya, jika orbit elektron terhadap intinya berjarak $0,53 \times 10^{10} \text{ m}$.

Penyelesaian

Disini $Q_1 = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $Q_2 = +1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ dan $r = 0,53 \times 10^{10} \text{ m}$

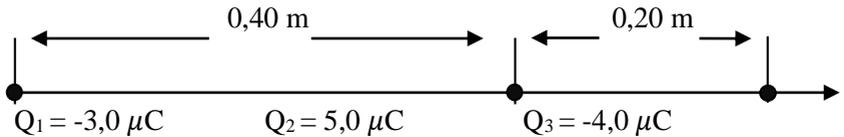
$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{(9 \times 10 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2) (-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) (+1,6 \times 10^{-19} \text{ C})}{(0,53 \times 10^{-10} \text{ m})^2}$$

$$= -8,2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

Tanda minus di sini menyatakan gaya tarik-menarik.

Contoh Soal 1.2

Hitunglah gaya elektrostatis pada partikel ke tiga ($Q_3 = -4 \mu\text{C}$) yang di akibatkan oleh dua partikel bermuatan lainnya.



Penyelesaian

$$F_1 = F_{31} + F_{32}$$

$$F_{31} = k \frac{Q_3 Q_1}{r_{31}} = \frac{(9 \times 10 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2) (-4,0 \times 10^{-6} \text{ C}) (-3,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(6 \times 10^{-1} \text{ m})^2}$$

$$= 0,5 \text{ N}$$

$$F_{32} = k \frac{Q_3 Q_2}{r_{32}} = \frac{(9 \times 10 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2) (-4,0 \times 10^{-6} \text{ C}) (+5,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(2 \times 10^{-1} \text{ m})^2}$$

$$= -4,5 \text{ N}$$

Jadi besar gaya elektrostatis \vec{F}_{31} merupakan gaya tolak dan \vec{F}_{32} merupakan gaya tarik. Maka,

$$F_3 = F_{31} + F_{32} = 0,5 \text{ N} + (-4,5 \text{ N}) = -4,0 \text{ N}$$

Contoh Soal 1.3

Suatu muatan titik $-Q_1$ ditempatkan dipusat sumbu x-y. Muatan $+Q_2$ terdistribusi secara merata pada seluruh permukaan bola dan mempunyai massa m berputar dengan kecepatan sudut ω dalam orbit lingkaran berjari-jari r terhadap pusat sumbu. Dengan mengabaikan gaya gravitasi, hitunglah jari-jari orbit lingkaran r .

Penyelesaian

- Gaya tarik elektrostatis pada Q_2

$$F = \frac{1}{4\pi E_0} \left(\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \right)$$

Mengarah ke pusat dan merupakan gaya setripetal maka

$$F = \frac{1}{4\pi E_0} \left(\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \right) = mr\omega^2$$

Dan

$$r = \left(\frac{Q_1 Q_2}{4\pi E_0 m \omega^2} \right)^{1/3}$$

Contoh Soal 1.4

Dua partikel yang bermuatan sama terpisah sejauh $3,2 \times 10^{-3} \text{m}$ satu sama lain, keduanya dilepas dari keadaan diam. Percepatan yang dialami oleh partikel pertama dan kedua masing-masing adalah $7,0 \text{ m/det}^2$ dan $9,0 \text{ m/det}^2$. Bila massa dari partikel pertama adalah $6,3 \times 10^{-7} \text{kg}$, tentukan !

- Massa partikel kedua
- Muatan dari masing-masing partikel

Penyelesaian

- Untuk menentukan massa partikel maka menggunakan prinsip F aksi = F reaksi

$$F_{1,2} = m_1 a_1$$

$$F_{2,1} = m_2 a_2$$

$$F_{1,2} = F_{2,1}$$

$$m_1 a_1 = m_2 a_2$$

$$(6,3 \times 10^{-7} \text{ kg})(7 \text{ m/det}^2) = m_2 (9 \text{ m/det}^2)$$

$$m_2 = \frac{(6,3 \times 10^{-7} \text{ kg})(7 \text{ m/det}^2)}{(9 \text{ m/det}^2)}$$

$$m_2 = 4,9 \times 10^{-7} \text{ kg}$$

- b. Menentukan muatan masing-masing partikel menggunakan Hukum Coulomb

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{r^2} = (6,3 \times 10^{-7} \text{ kg}) \times (7 \text{ m/det}^2)$$

$$(9 \times 10^9) \frac{q^2}{(3,2 \times 10^{-3})^2} = 44,1 \times 10^{-7} \text{ N}$$

$$q^2 \frac{(9 \times 10^9)}{(3,2 \times 10^{-3})^2} = 44,1 \times 10^{-7} \text{ N}$$

$$q^2 = 44,1 \times 10^{-7} \text{ N} \frac{(3,2 \times 10^{-3})^2}{(9 \times 10^9)}$$

$$q^2 = 44,1 \times 10^{-7} \text{ N} \frac{10,24 \times 10^{-6}}{(9 \times 10^9)}$$

$$q^2 = 50,176 \times 10^{-22} \text{ C}^2$$

$$q = \sqrt{50,176 \times 10^{-22} \text{ C}^2}$$

$$q = 7,08 \times 10^{-11} \text{ C}$$

Jadi besar muatan q_2 adalah sebesar $7,08 \times 10^{-11} \text{ C}$

Contoh Soal 1.5

Muatan titik $-Q_1$ ditempatkan dipusat sumbu x-y. Muatan $+Q_2$ terdistribusi secara merata pada seluruh permukaan bola dan mempunyai massa m berputar dengan kecepatan sudut ω dalam orbit lingkaran berjari-jari r terhadap pusat sumbu. Dengan mengabaikan gaya grafitasi, hitunglah jari-jari orbit lingkaran r !

Penyelesaian

- Gaya tarik elektrostatika pada Q_2

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \right)$$

Mengarah ke pusat dan merupakan gaya sentripetal dimana persamaan untuk gaya sentripetal adalah :

$$F = mr\omega^2$$

Sehingga

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \left(\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \right) = mr\omega^2$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_o} \left(\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \right) = mr\omega^2$$

$$mr\omega^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$mr^3\omega^2 = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_o}$$

$$r^3 = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_o} \cdot \frac{1}{m\omega^2}$$

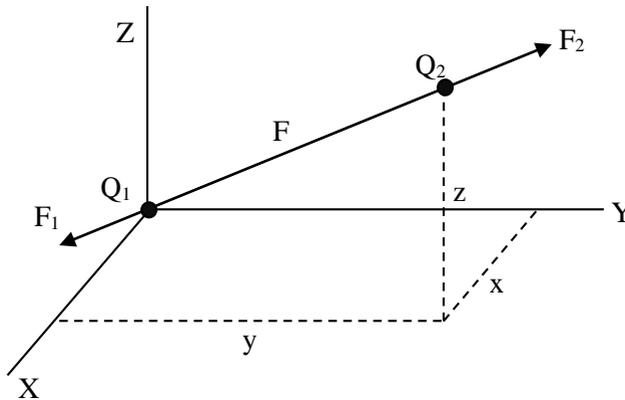
$$r = \left(\frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_o} \cdot \frac{1}{m\omega^2} \right)^{1/3}$$

Maka dapat ditulis dengan

$$r = \left(\frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_o m\omega^2} \right)^{1/3}$$

Contoh Soal 1.6

Perhatikan Gambar



Pada gambar di atas $Q_1 = 200 \mu\text{C}$, $Q_2 = 30 \mu\text{C}$, $x=20 \text{ cm}$, $y=25 \text{ cm}$, $z=30 \text{ cm}$. Tentukan besar dan arah gaya F_2 .

- Dalam ruang bebas
- Dalam medium dengan konstanta dielektrik 2,5.

Penyelesaian

$$\text{a. } r = \left(x^2 + y^2 + Z^2\right)^{1/2} = \left(20^2 + 25^2 + 30^2\right)^{1/2} \\ = 43,875 \text{ cm} = 0,43875 \text{ m}$$

Dan besar gaya F_2 adalah :

$$F_1 = \frac{kq_1q_2}{r^2} \\ F_1 = \frac{(9,0 \times 10^9)(200 \times 10^{-6})(30 \times 10^{-6})}{(0,43875)^2}$$

$$F_1 = 280,52 \text{ N}$$

Arah F_2 terhadap sumbu x, y, z positif adalah :

$$\text{Cos } \alpha = \frac{x}{r} = \frac{20}{43,875} = 0,4558$$

$$\cos \beta = \frac{y}{r} = \frac{25}{43,875} = 0,5698$$

$$\cos \alpha = \frac{z}{r} = \frac{30}{43,875} = 0,6838$$

$$b. F_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_r \epsilon_o} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{280,52}{2,5} = 112,21 \text{ N}$$

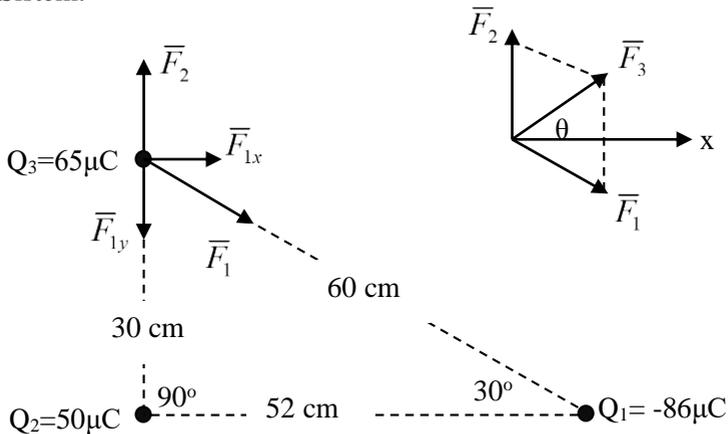
Arah F_2 dalam medium sama dengan dalam (a)

Contoh Soal 1.7

Tentukan besar dan arah gaya pada muatan Q_1 seperti ditunjukkan pada gambar akibat muatan Q_1 dan Q_2 !

Penyelesaian

Sistem:



Gaya \vec{F}_1 adalah gaya tarik dan \vec{F}_2 adalah gaya tolak

- Besar gaya F_1 adalah :

$$F_1 = \frac{kq_3q_1}{r^2} \text{ dimana nilai } k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2$$

$$F_1 = \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2)(6,5 \times 10^{-5} \text{ C})(8,6 \times 10^{-5} \text{ C})}{(0,60 \text{ m})^2} = 140 \text{ N}$$

- Besar gaya F_2 adalah :

$$F_2 = \frac{kq_3q_2}{r^2} \text{ dimana nilai } k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2$$

$$F_2 = \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2)(6,5 \times 10^{-5} \text{ C})(5,0 \times 10^{-5} \text{ C})}{(0,30 \text{ m})^2} = 330 \text{ N}$$

- Besar komponen-komponen gaya F_1 pada sumbu x dan y adalah :

$$F_{1x} = F_1 \cos 30^\circ = 140 \text{ N} \times \frac{1}{2} \sqrt{3} = 120 \text{ N}$$

$$F_{2x} = F_1 \cos 90^\circ = 140 \text{ N} \times 0 = 0$$

- Besar komponen-komponen F_2 pada sumbu x dan y adalah

$$F_{1y} = -F_1 \sin 30^\circ = -140 \text{ N} \times \frac{1}{2} = -70 \text{ N}$$

$$F_{2y} = F_2 \sin 90^\circ = 330 \text{ N} \times 1 = 330 \text{ N}$$

- Maka

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} = 120 \text{ N} + 0 = 120 \text{ N}$$

$$F_y = F_{1y} + F_{2y} = -70 \text{ N} + 330 \text{ N} = 260 \text{ N}$$

- Dengan demikian besar gaya \bar{F}_3 adalah :

$$F_3 = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(120 \text{ N})^2 + (260)^2}$$

$$F_3 = \sqrt{14400 + 67600} = \sqrt{82000} = 286,35 \text{ N}$$

- Dengan demikian gaya \vec{F}_3 adalah :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{F_y}{F_x} = 260N / 120N = 2,2 \text{ atau } \theta = 65^\circ$$

Contoh Soal 1.7

Dalam gambar pada contoh soal nomor 7 Q_1 adalah partikel α (muatan $2e$), Q_2 elektron dan $r = 1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$. Jika partikel-partikel ini dari keadaan diam, hitunglah percepatan awal masing-masing partikel!

Penyelesaian

- Gaya pada elektron adalah

$$F_2 = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \hat{r} = \frac{(9 \times 10^9)(3,2 \times 10^{-19})(-1,6 \times 10^{-19})}{(10^{-10})^2} \hat{r}$$

$$= -4,61 \times 10^{-8} \hat{r} \text{ N}$$

Disini

$$\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r} = \frac{20\hat{i} + 25\hat{j} + 30\hat{k}}{43,875} \text{ dan } m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

Dengan menggunakan hukum Newton ke dua di peroleh percepatan elektron :

$$\vec{a}_2 = \frac{F_2}{m_e} = \frac{-4,61 \times 10^{-8} \hat{r}}{9,11 \times 10^{-31}} = -5,06 \times 10^{22} \text{ r m / s}^2$$

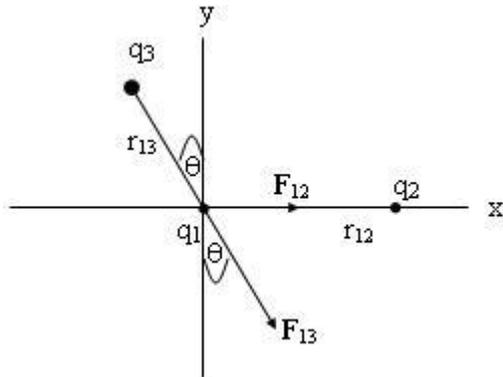
Gaya pada partikel α adalah F_2 dan massanya $6,65 \times 10^{-27} \text{ kg}$ sehingga percepatannya

$$\vec{a}_1 = \frac{+4,61 \times 10^{-8} \hat{r}}{6,65 \times 10^{-31}} = 6,93 \times 10^{22} \text{ r m / s}^2$$

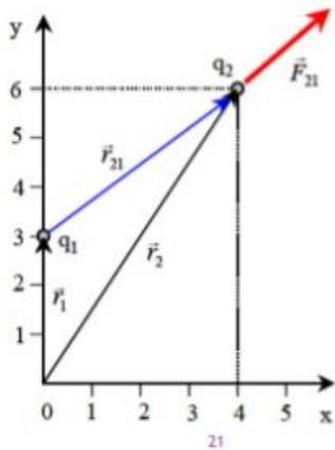
Evaluasi

1. Mengapa garis-garis gaya suatu medan listrik tidak mungkin saling berpotongan ?
2. Dua buah muatan listrik a dan b dimana nilai muatan a dua kali lebih besar dari muatan b dan diletakkan pada r meter sehingga terjadi gaya Coulomb sebesar F_1 N. Ketika jarak kedua muatan diubah menjadi $\frac{1}{2}$ kali semula, maka gaya Coulomb yang dialami kedua muatan adalah sebesar ...
3. Jumlah muatan dari dua buah muatan q_1 dan q_2 sebesar $-6\mu\text{C}$. Jika kedua muatan tersebut dipisahkan sejauh 3 m, maka masing-masing muatan akan merasakan gaya listrik sebesar 8 mN. Tentukan besar muatan q_1 dan q_2 !
4. Tiga muatan titik terletak pada sumbu x ; $q_1 = 25$ nC terletak pada titik asal, $q_2 = -10$ nC berada pada $x=2\text{m}$, dan $q_3 = 20$ nC berada pada $x = 3,5$ m. Tentukan gaya total pada q_3 akibat q_1 dan q_2 !
5. Berapakah jarak antara dua buah elektron dengan gaya tolak-menolak sebesar 10^{-8}N ?
6. Misalkan muatan positif total dan muatan negatif total di dalam sebuah uang tembaga dipisahkan sampai sebuah jarak sehingga gaya tarik diantara muatan-muatan tersebut adalah 4,5 N. Berapakah seharusnya jarak diantara muatan-muatan tersebut ?
7. Dua buah muatan tarik-menarik dengan gaya 10^{-6} N bila berjarak 1 cm satu terhadap yang lain.
 - a. Berapakah jarak antara kedua muatan tersebut jika gaya yang bekerja sebesar 10^{-4} N ?
 - b. Berapakah jarak antara kedua muatan tersebut jika gaya yang bekerja sebesar 10^{-10} N ?
8. Muatan 1×10^{-7} C dan 3×10^{-7} C terpisah sejauh 50 cm.
 - a. Dimanakah suatu muatan $+q$ harus diletakkan diantara kedua muatan tersebut, agar tidak ada gaya yang bekerja padanya ?

- b. Dimanakah suatu muatan $-q$ harus diletakkan diantara kedua muatan tersebut, agar tidak ada gaya yang bekerja padanya ?
9. Tiga buah muatan q_1 , q_2 , dan q_3 diletakkan pada titik seperti Gambar 4.1.6. Jika $q_1 = -1,0 \times 10^{-6} \text{ C}$, $q_2 = +3,0 \times 10^{-6} \text{ C}$, dan $q_3 = -2,0 \times 10^{-6} \text{ C}$, $r_{12} = 15 \text{ cm}$, $r_{13} = 10 \text{ cm}$, dan $q = 30$, tentukanlah gaya yang bekerja pada q_1 !



10. Contoh muatan $q_1 = 2 \text{ mC}$ berada pada koordinat $(0,3) \text{ m}$ dan muatan $q_2 = 4 \text{ mC}$ berada pada koordinat $(4,6) \text{ m}$. Lihat gambar di bawah ini! Tentukan gaya yang dilakukan muatan q_1 pada muatan q_2 !



2

Medan Magnet di Sekitar Arus Listrik

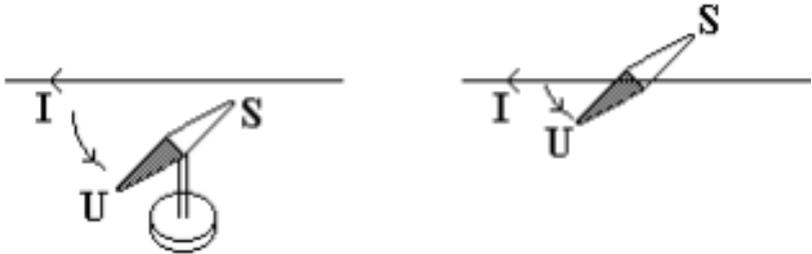
2.1 Percobaan Oersted

Sebuah kawat apabila dialiri oleh arus listrik akan menghasilkan medan magnet yang garis-garis gayanya berupa lingkaran-lingkaran yang berada di sekitar kawat tersebut. Arah dari garis-garis gaya magnet ditentukan dengan kaidah tangan kanan (apabila kita menggenggam tangan kanan ibu jari sebagai arah arus listrik sedang keempat jari yang lain merupakan arah medan magnet). (Hk. Oersted)

Di atas jarum kompas yang seimbang dibentangkan seutas kawat, sehingga kawat itu sejajar dengan jarum kompas. jika kedalam

kawat dialiri arus listrik, ternyata jarum kompas berkisar dari keseimbangannya.

Kesimpulan : Di sekitar arus listrik ada medan magnet

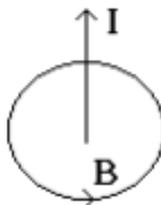


Gambar 2.1. Arah penyimpangan jarum kompas

Cara menentukan arah perkisaran jarum.

- Bila arus listrik yang berada diantara telapak tangan kanan dan jarum magnet mengalir dengan arah dari pergelangan tangan menuju ujung-ujung jari, kutub utara jarum berkisar ke arah ibu jari.
- Bila arus listrik arahnya dari pergelangan tangan kanan menuju ibu jari, arah melingkarnya jari tangan menyatakan perkisaran kutub Utara.

Pola garis-garis gaya di sekitar arus lurus. Pada sebidang karton datar ditembuskan sepotong kawat tegak lurus, di atas karbon ditaburkan serbuk besi menempatkan diri berupa lingkaran-lingkaran yang titik pusatnya pada titik tembus kawat.



Gambar 2.2 Pola garis gaya di sekitar kawat lurus

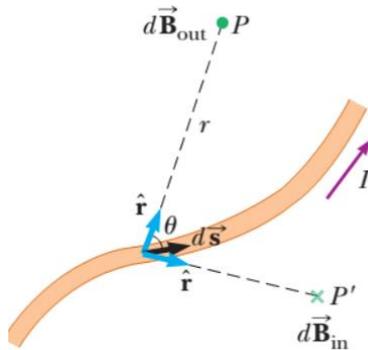
Kesimpulan : Garis-garis gaya di sekitar arus lurus berupa lingkaran-lingkaran yang berpusatkan pada arus tersebut. Cara menentukan arah medan magnet Bila arah dari pergelangan tangan menuju ibu jari, arah melingkar jari tangan menyatakan arah medan magnet.

2.1 Hukum Biot Savart

Pada saat Hans Christian Oersted mengadakan percobaan untuk mengamati hubungan antara kelistrikan dan kemagnetan, ia belum sampai menghitung besarnya kuat medan magnet di suatu titik di sekitar kawat berarus. Perhitungan secara matematik baru dikemukakan oleh 115 ilmuwan dari Prancis yaitu Jean Bastiste Biot dan Felix Savart. Berdasarkan hasil eksperimennya tentang pengamatan medan magnet di suatu titik P yang dipengaruhi oleh suatu kawat penghantar dl , yang dialiri arus listrik I diperoleh kesimpulan bahwa besarnya kuat medan magnet (yang kemudian disebut induksi magnet yang diberi lambang B) di titik P.

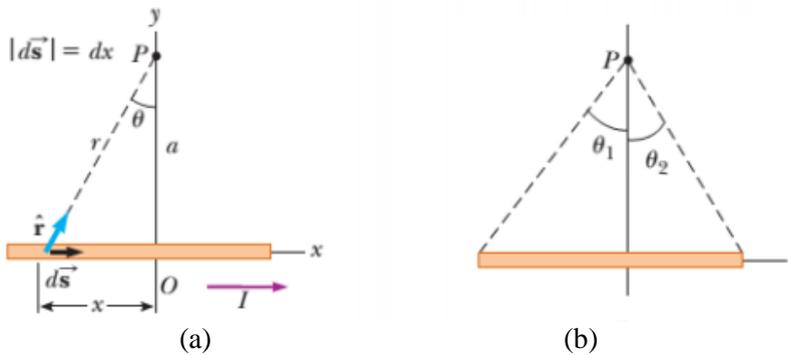
a. Kuat Medan Magnet pada Kawat Lurus

Sebagai catatan medan dB pada hukum Biot-Savart adalah medan yang diciptakan pada titik oleh arus pada elemen ds dari konduktor. Untuk menemukan medan total maka persamaan harus diintegrasikan sebagai berikut:



Gambar 2.3 Gambaran hukum Biot-Savart pada kawat lurus

$$\vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{\mathbf{s}} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2} \quad (1)$$



Gambar 2.4 Model perhitungan untuk menentukan kuat medan pada kawat lurus

Perhatikan Gambar 3, untuk menentukan kuat medan listrik dapat dilakukan dengan persamaan !

$$d\vec{\mathbf{s}} \times \hat{\mathbf{r}} = |d\vec{\mathbf{s}} \times \hat{\mathbf{r}}| \hat{\mathbf{k}} = \left[dx \sin \left(\frac{\mu}{2} - \theta \right) \right] \hat{\mathbf{k}} = (dx \cos \theta) \hat{\mathbf{k}} \quad (2)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2) ke persamaan (1) maka diperoleh

$$1. \quad d\vec{\mathbf{B}} = (dB) \hat{\mathbf{k}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dx \cos \theta}{r^2} \hat{\mathbf{k}} \quad (3)$$

$$2. \quad r = \frac{a}{\cos \theta} \quad (4)$$

$$3. \quad dx = -a \sec^2 \theta d\theta = -\frac{a d\theta}{\cos^2 \theta} \quad (5)$$

$$4. \quad dB = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{(a d\theta) \cos \theta \cos^2 \theta}{a^2 \cos^2 \theta} = -\frac{\mu_0 I}{4\pi a} \cos \theta d\theta \quad (6)$$

Sehingga

$$\vec{\mathbf{B}} = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos\theta \, d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} (\sin\theta_1 - \sin\theta_2) \quad (7)$$

Untuk kawat

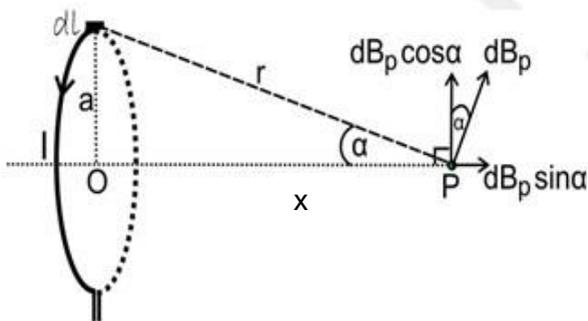
$$\vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (8)$$

Persamaan (8) merupakan persamaan Biot-Savart untuk menentukan kuat medan listrik pada kawat lurus.

Menurut Teori Laplace, besar induksi magnet yang disebabkan oleh elemen arus adalah :

- Berbanding lurus dengan kuat arus listrik (I).
- Berbanding lurus dengan panjang kawat (dl).
- Berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara titik P ke elemen kawat penghantar (r).
- Arah induksi magnetnya tegak lurus terhadap bidang yang melalui elemen arus.
- Sebanding dengan sinus sudut apit T antara arah arus dengan garis hubung antara titik P ke elemen kawat penghantar. Pernyataan tersebut dikenal dengan hukum Biot Savart.

b. Kuat Medan Magnet di Pusat Lingkaran



Gambar 2.5 Analisa kuat medan di pusat lingkaran

Gambar 2.5 menunjukkan sebuah aliran arus listrik pada kawat melingkar dengan jari-jari a . Kita akan menghitung besar dan arah medan magnet di titik P yang berjarak x dari pusat lingkaran. Untuk menentukan nilai B total, maka kita akan Medan Magnet Sebuah Simpul Arus Lingkaran menjumlahkan nilai B akibat segmen dl secara keseluruhan. Berdasarkan Hukum BioSavart, kita akan mendapatkan nilai dB sebagai berikut :

$$dB_x = dB_p \sin \alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{(x^2 + a^2)} \frac{a}{(x^2 + a^2)^{1/2}} \quad (9)$$

$$dB_y = dB_p \cos \alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl}{(x^2 + a^2)} \frac{a}{(x^2 + a^2)^{1/2}} \quad (10)$$

Dari kedua komponen tersebut, maka dapat kita lihat bahwa hanya komponen ke arah sumbu x saja yang tersisa, sedangkan yang ke arah sumbu y medan magnet bernilai nol.

$$B_x = \int \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{a dl}{(x^2 + a^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{a}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \int dl \quad (11)$$

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{a}{(x^2 + a^2)^{3/2}} \int dl \quad (12)$$

Hasil Integral dl adalah $2\pi a$, sehingga kita peroleh :

$$B_x = \frac{\mu_0 I a^2}{2(x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (13)$$

Jika terdapat N lilitan (kumparan) maka persamaannya menjadi

$$B_x = \frac{\mu_0 N I a^2}{2(x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (14)$$

Besar momen dipol magnetik μ yang besarnya IA . Dimana A adalah luas penampang lingkaran yang besarnya πa^2 . Sehingga $\mu = I \pi a^2$. Sedangkan untuk N lilitan maka $\mu = NI \pi a^2$

$$B_x = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi(x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (15)$$

Jika $\mu = NI \pi a^2$ maka persamaan (15) menjadi :

$$B_x = \frac{\mu_0 NI \pi a^2}{2\pi(x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (16)$$

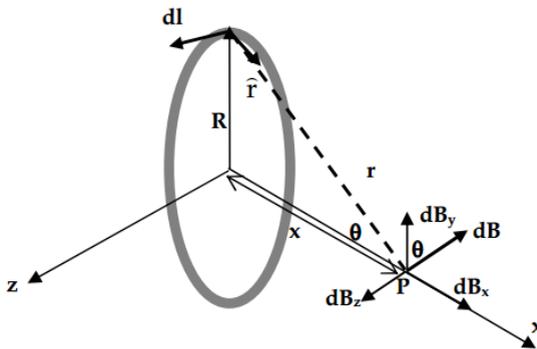
Sekarang akan kita tentukan nilai medan magnet persis di pusat lingkaran, atau untuk nilai $x=0$, maka jika nilai $x=0$ dimasukan pada Persamaan 16 akan kita peroleh persamaan sbb

$$B_x = \frac{\mu_0 NI}{2a} \quad (17)$$

Persamaan (17) merupakan persamaan Biot-Savart untuk menentukan kuat medan magnet di sekitar kawat melingkar dengan N lilitan.

c. Medan Magnet Sepanjang Sumbu Kawat Melingkar

Untuk menghitung medan magnet pada suatu titik P sepanjang sumbu sejauh x dari pusat kawat lingkaran berarus berjari-jari R, kita gambarkan kembali sebuah kawat lingkaran berarus listrik sebagai berikut :



Gambar 2.6 Medan Magnet pada titik P Sejauh x dari sumbu sebuah kawat lingkaran berarus listrik Dengan menggunakan hukum Biot-Savart :

$$d\mathbf{B}(P) = \frac{\mu_o}{4\pi} I \frac{d\mathbf{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (18)$$

di mana r, yaitu jarak dari suatu titik dalam kawat ke titik P, menurut hukum segitiga Phytagoras dapat dituliskan sebagai :

$$r^2 = x^2 + R^2 \quad (18)$$

sudut yang dibentuk vektor dl dengan vektor satuan \hat{r} adalah 90° , sehingga :

$$d\mathbf{l} \times \hat{r} = dl \sin 90^\circ = dl \quad (19)$$

Sehingga

$$d\mathbf{B}(P) = \frac{\mu_o}{4\pi} I \frac{d\mathbf{l}}{x^2 + R^2} \quad (20)$$

Komponen medan magnet yang akan kita hitung hanyalah arah x saja dB_x , mengingat medan magnet arah z akan saling menghilangkan, demikian pula medan magnet pada arah y. Untuk medan magnet komponen-x di P berlaku hubungan :

$$dB_x = dB \cdot \sin \theta = dB \frac{R}{\sqrt{x^2 + R^2}} \quad (21)$$

dengan demikian :

$$\begin{aligned} dB_x &= \frac{\mu_o}{4\pi} I \frac{d\mathbf{l}}{x^2 + R^2} \frac{R}{\sqrt{x^2 + R^2}} \\ &= \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{IR}{(x^2 + R^2)^{3/2}} d\mathbf{l} \end{aligned} \quad (22)$$

Jika kita lakukan proses integrasi pada dl untuk seluruh lingkaran, nilai x dan R tidak akan berubah sehingga dapat dianggap konstanta, sehingga :

$$B_x = \int_{\text{lingkaran}} dB_x = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{IR}{(x^2 + R^2)^{3/2}} \int_{\text{lingkaran}} d\mathbf{l} \quad (23)$$

integral lingkaran dari $d\mathbf{l}$ adalah keliling lingkaran yakni $2\pi R$, sehingga :

$$B_x = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{IR}{(x^2 + R^2)^{3/2}} 2\pi R \quad (24)$$

Sehingga medan magnet

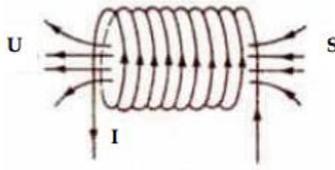
$$B_x = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{2\pi IR^2}{(x^2 + R^2)^{3/2}} \quad (25)$$

d. Medan Magnet pada Solenoida

Solenoida adalah induktor yang terdiri gulungan kawat yang kadang di dalamnya dimasukkan sebuah batang besi berbentuk silinder sebagai dengan tujuan memperkuat medan magnet yang dihasilkannya seperti terlihat dalam gambar 6.11 di samping. Solenoida digunakan dalam banyak perangkat elektronika seperti bel pintu atau pengeras suara. Secara skematik bentuk dari solenoida dapat dilihat pada gambar 6.12 di mana solenoida terdiri dari n buah lilitan kawat berarus listrik I , medan magnet yang dihasilkan memiliki arah seperti pada gambar, di mana kutub utara magnet mengikuti aturan tangan kanan 1.



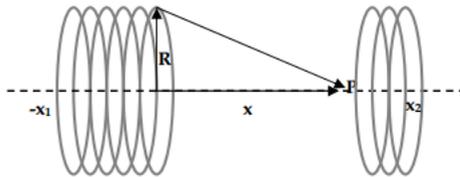
Gambar 2.7 Solenoida dengan inti besi



Gambar 2.8 Solenoida dengan banyaknya lilitan N

Besarnya kuat medan magnet yang dihasilkan pada sebuah titik P pada sumbu di dalam solenoida dapat difikirkan sebagai jumlah dari medan magnet yang dihasilkan sebuah kawat berbentuk lingkaran yang telah kita hitung sebelumnya, dengan x yang berubah, sehingga dari persamaan (5) :

$$dB_x = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{2\pi IR^2}{(x^2 + R^2)^{3/2}} dx \quad (26)$$



Gambar 2.9 Medan Magnet Dalam Suatu Solenoida

Jika solenoida memiliki panjang L yang terdiri dari N buah lilitan, maka jumlah lilitan persatuan panjang sebut saja n adalah $n=N/L$. Maka jika kita jumlahkan seluruh lilitan sebanyak ndx , kita harus melakukan integrasi untuk seluruh dx dari $-x_1$ ke x_2 :

$$dB_x = \frac{\mu_o}{4\pi} 2\pi n I R^2 \int_{-x_1}^{x_2} \frac{1}{(x^2 + R^2)^{3/2}} dx \quad (27)$$

hasil dari bentuk integral ini dapat dilihat pada tabel-tabel integral baku pada buku kalkulus anda, di mana berlaku :

$$\int_{-x_1}^{x_2} \frac{1}{(x^2 + R^2)^{3/2}} dx = \frac{x}{R^2 \sqrt{x^2 + R^2}} \quad (28)$$

sehingga :

$$B_x = \frac{\mu_o}{4\pi} 2\pi n I R^2 \frac{x}{R^2 \sqrt{x^2 + R^2}} \Big|_{-x_1}^{x_2}$$

$$B_x = \frac{\mu_o n I}{2} \left(\frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + R^2}} + \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + R^2}} \right)$$

Sehingga medan magnet di tengah sumbu solenoida adalah :

$$B = \frac{\mu_o n I}{2} \left(\frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + R^2}} + \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + R^2}} \right) \quad (29)$$

Jika jari jari solenoida R kita anggap jauh lebih kecil dari x_1 dan x_2 , maka suku pertama dalam kurung pada persamaan terakhir dapat didekati :

$$\frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + R^2}} \approx \frac{x_2}{\sqrt{x_2^2}} = 1 \quad (30)$$

begitu juga suku kedua, sehingga :

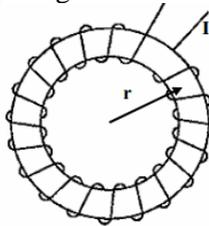
$$B_x = \frac{\mu_o n I}{2} (2) \quad (31)$$

dengan demikian kita peroleh kuat medan magnet untuk solenoida dengan jumlah lilitan persatuan panjang n adalah :

$$B = \mu_o \cdot n \cdot I \quad (32)$$

e. Medan Magnet pada Toroida

Toroida adalah kawat berarus yang dililitkan pada bahan berbentuk donat seperti pada gambar 10 di bawah :



Gambar 2.10 Toroida berjari-jari r

Besarnya induksi magnetik di pusat sumbu toroida adalah :

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2\pi r} \quad (33)$$

Dimana

B = induksi magnet di pusat (tengah-tengah) toroida

μ_0 = permeabilitas ruang hampa

I = kuat arus listrik dalam toroida

N = jumlah lilitan dalam toroida

$2\pi r$ = keliling toroida

Contoh Soal 2.1

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?

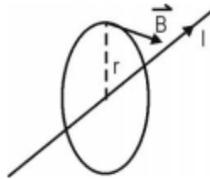
Penyelesaian

- Gunakan persamaan

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

sehingga

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



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

Maka kita peroleh

$$I = \frac{(2\pi)(3 \times 10^{-1})(0,55 \times 10^{-4})}{4\pi \times 10^{-7}}$$

$$I = \frac{(3 \times 10^{-1})(0,55 \times 10^{-4})}{2 \times 10^{-7}}$$

$$I = \frac{1,65 \times 10^{-5}}{2 \times 10^{-7}} = 0,825 \times 10^2 = 82,5 \text{ A}$$

Jadi arus yang mengalir pada kawat adalah sebesar 82,5 A.

Contoh Soal 2.2

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

Penyelesaian

- Gunakan persamaan

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

Dengan

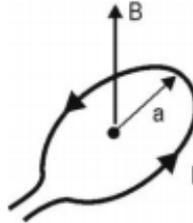
$$a = 20 \text{ cm} = 2 \times 10^{-1} \text{ m}$$

Maka

$$B = \frac{(4\pi \times 10^{-7})(10)}{2(2 \times 10^{-1})}$$

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-1}} = \pi \times 10^{-5} \text{ T} = 3,14 \times 10^{-5} \text{ T}$$

Jadi besar medan magnet pada pusat cincin $3,14 \times 10^{-5} \text{ T}$.



Contoh Soal 2.3

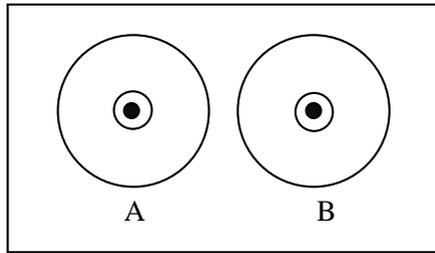
Tentukan medan magnet diantara dua kawat lurus sepanjang 10 cm. Dimana masing-masing kawat membawa arus sebesar 10 A dan yang lain 8 A, jika

- a. Kedua arus mengalir searah
- b. Kedua arus mengalir berlawanan arah

Penyelesaian

- a. Kedua medan magnet akan saling menjumlahkan. Di tengah-tengah diantara kedua kawat, baik pada kedua arus yang searah maupun berlawanan arah. Jika kedua searah, maka diilustrasikan bahwa kedua kawat membawa arus keluar bidang, seperti ditunjukkan gambar:

b.



Maka kuat medan diantara keduanya

$$B = B_A - B_B = \frac{\mu_o}{2\pi r} (I_A - I_B)$$

$$B = B_A - B_B = \frac{(4\pi \times 10^{-7})}{2\pi(5 \times 10^{-2})} (10 - 8)$$

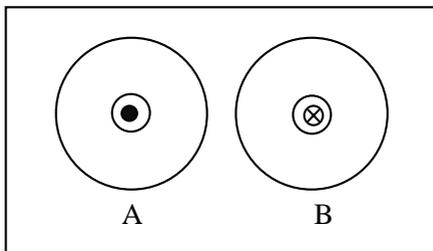
$$B = B_A - B_B = \frac{(2 \times 10^{-7})}{(5 \times 10^{-2})} (10 - 8)$$

$$B = B_A - B_B = (0,4 \times 10^{-5}) (2)$$

$$B = B_A - B_B = 0,8 \times 10^{-5} T$$

Karena muatan B_A dianggap muatan positif, maka kuat medan yang dihasilkan berada pada arah yang sama dengan arah B_A .

c. Untuk arus yang berlawanan arah. Jika keduanya berlawanan arah, maka diilustrasikan bahwa salah satu kawat membawa arus keluar bidang, dan yang lainnya membawa arus masuk bidang, seperti ditunjukkan gambar:



Maka kuat medan diantara keduanya

$$B = B_A + B_B = \frac{\mu_o}{2\pi r} (I_A + I_B)$$

$$B = B_A + B_B = \frac{(4\pi \times 10^{-7})}{2\pi(5 \times 10^{-2})} (10 + 8)$$

$$B = B_A + B_B = \frac{(2 \times 10^{-7})}{(5 \times 10^{-2})} (10 + 8)$$

$$B = B_A + B_B = (0,4 \times 10^{-5})(18)$$

$$B = B_A + B_B = 7,2 \times 10^{-5} T$$

Contoh Soal 2.4

Sebuah solenoida dengan jari-jari 1 cm dan panjang 5 cm terdiri dari 500 lilitan menyalurkan arus listrik sebesar 5 Ampere. Hitunglah medan magnet yang dihasilkan di pusat solenoida.

Penyelesaian

Kita dalam hal ini tidak menganggap jari-jari solenoida R jauh lebih kecil dari L , sehingga persamaan (32) tidak bisa kita gunakan. Dengan meletakkan pusat solenoida pada pusat koordinat, maka melalui persamaan (29) :

$$B = \frac{\mu_o \cdot n \cdot I}{2} \left(\frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + R^2}} + \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + R^2}} \right) \quad (32)$$

Dimana n adalah banyaknya lilitan persatuan panjang sehingga

$$B = \frac{(4\pi \times 10^{-7}) \cdot \frac{500}{0,05} \cdot 5}{2} \left(\frac{2,5}{\sqrt{(2,5)^2 + 1^2}} + \frac{2,5}{\sqrt{(2,5)^2 + 1^2}} \right)$$

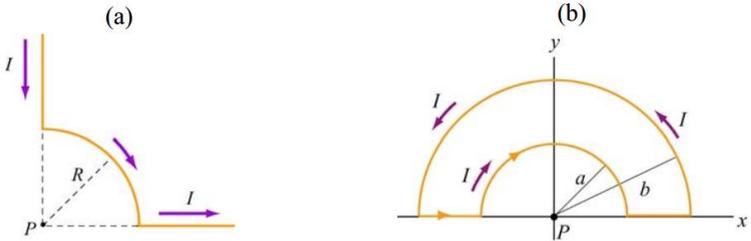
$$B = \pi \times 10^{-2} \left(\frac{2,5}{\sqrt{(2,5)^2 + 1^2}} + \frac{2,5}{\sqrt{(2,5)^2 + 1^2}} \right)$$

$$B = \pi \times 10^{-2} \left(\frac{5}{\sqrt{7,25}} \right)$$

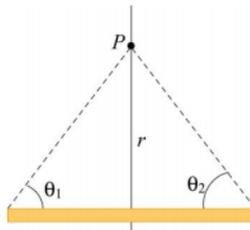
$$B = 5,83 \times 10^{-2} \text{ Tesla}$$

Evaluasi

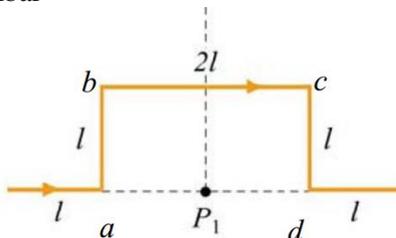
1. Tentukan kuat medan magnet di titik P untuk sistem seperti ditunjukkan di bawah ini !



2. Sebuah batang konduktor berbentuk loop persegi dengan panjang sisi 0,4 m membawa arus sebesar 10 A seperti pada gambar.

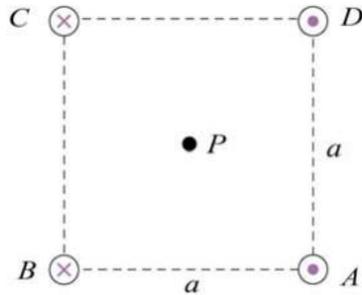


- a. Tentukan kuat medan magnet di pusat loop persegi !
 - b. Jika bentuk loop dirubah menjadi lingkaran maka tentuan kuat medan magnetnya !
3. Perhatikan Gambar



Sebuah kawat ditekuk ke bentuk yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini, dan medan magnetnya diukur pada P_1 saat arus dialirkan ke melalui kawat sebesar I ampere. Tentukan kuat medan magnet dari sistem tersebut di titik P_1 !

4. Empat kabel sejajar dengan panjang tak terhingga membawa arus yang sama I yang ditata sedemikian rupa sehingga membentuk bidang persegi seperti gambar di bawah ini.



Arus di titik A dan titik D menuju keluar bidang sedangkan arus di titik C dan D masuk bidang. Tentukan kuat medan magnet di pusat persegi !

3 Gaya Lorentz

3.1 Gaya Lorentz pada Kawat Berarus Listrik

Jika ada sebuah penghantar yang dialiri arus listrik dan penghantar tersebut berada dalam medan magnetik maka akan timbul gaya yang disebut dengan nama gaya magnetik atau dikenal juga nama Gaya Lorentz. Perlu diingat bahwa arah dari Gaya Lorentz selalu tegak lurus dengan arah arus listrik (I) dan induksi magnetik yang ada (B). Jadi kalau dibayangkan seperti koordinat ruangan tiga dimensi dengan tiga sumbu. Dimana untuk masing-masing sumbu mewakili arus listrik, medan magnet, dan arah gaya lorentz.

Apabila kawat penghantar dengan panjang l yang dialiri arus listrik sebesar I , kemudian kawat tersebut diletakkan pada daerah yang

dipengaruhi medan magnet B , maka kawat tersebut akan mengalami gaya Lorentz yang besarnya dipengaruhi oleh besar medan magnet, kuat arus dan sudut yang dibentuk oleh medan magnet dan arus listrik. Dalam sebuah persamaan Gaya Lorentz ditulis dengan:

$$F_{\text{lorentz}} = BIl \sin \alpha \quad (1)$$

Dimana

B = kuat medan listrik (Tesla)

I = kuat arus listrik (Ampere)

l = panjang kawat (meter)

α = sudut yang dibentuk oleh B dan I

3.2 Arah Gaya Lorentz

Gaya lorentz merupakan besaran vektor. Dimana selain memiliki besar gaya Lorentz juga memiliki arah. Dalam berbagai aplikasi kasus sering sekali menanyakan besar dan arah dari gaya lorentz. Untuk menentukan arah gaya lorentz sobat bisa menggunakan dua alternatif cara/kaidah yaitu kaidah tangan kanan atau kaidah pemutaran sekrup.



Gambar 4.1. Kaidah tangan kanan menentukan gaya Lorentz

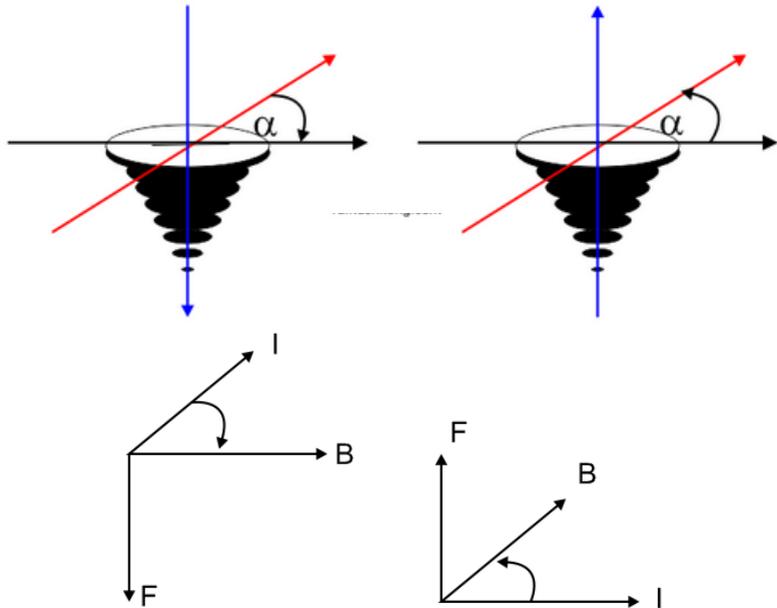
Keterangan

Ibu Jari = arah arus listrik

Jari Telunjuk = arah medan magnet

Jari Tengah = arah gaya lorentz

Penentuan arah gaya Lorentz yang kedua adalah menggunakan kaidah skrup. Perhatikan Gambar :

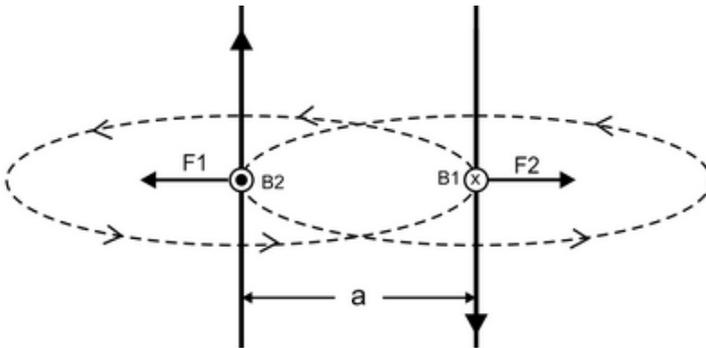


Gambar 4.2 Arah gaya Lorentz dengan kaidah skrup

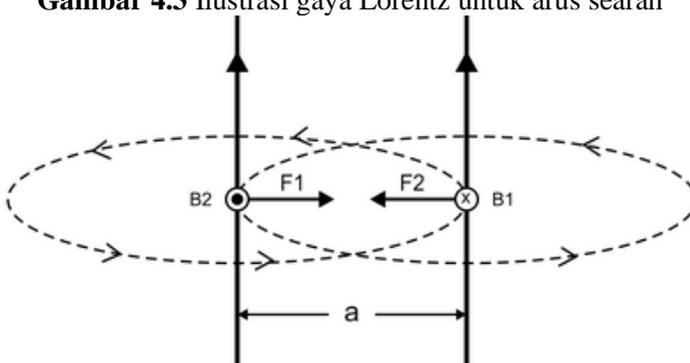
Jika sekrup diputar dari I ke B searah dengan arah jarum jam maka arah gaya Lorentz ke bawah. Sebaliknya, jika diputar dari I ke B dengan arah berlawanan arah jarum jam maka akan menghasilkan gaya Lorentz ke arah atas.

3.3 Gaya Lorentz pada Kawat Sejajar yang Berarus Listrik

Jika ada dua buah kawat lurus berarus listrik yang diletakkan sejajar berdekatan pada sebuah medan magnet, maka akan mengalami gaya Lorentz. Gaya Lorentz yang dialami berupa gaya tarik menarik apabila arus listrik pada kedua kawat tersebut searah. Jika arus listrik pada kedua kawat berlawanan maka yang timbul adalah gaya tolak menolak. Perhatikan Gambar 4.3,



Gambar 4.3 Ilustrasi gaya Lorentz untuk arus searah



Gambar 4.4 Ilustrasi gaya Lorentz untuk arus berlawanan arah

Besarnya gaya tarik menarik atau tolak menolak di antara dua kawat sejajar yang berarus listrik dan terpisah sejauh a dapat ditentukan dengan menggunakan rumus

$$F_1 = F_2 = F = \frac{\mu_o I_1 I_2 l}{2\pi a} \quad (2)$$

Dimana:

$F_1 = F_2 = F$ = gaya tarik-menarik atau tolak menolak(Newton)

μ_o = permeabilitas vakum ($4 \pi \cdot 10^{-7}$ Wb/Am)

I_1 = kuat arus pada kawat A

I_2 = kuat arus pada kawat B

l = panjang kawat penghantar

a = jarak kedua kawat

3.4 Gaya Lorentz pada Muatan Bergerak dalam Medan Magnet

Gaya Lorentz ternyata tidak hanya dialami oleh kawat tetapi juga muatan listrik yang bergerak. Apabila muatan listrik q bergerak dengan kecepatan v di dalam sebuah medan magnet B , maka muatan listrik tersebut akan mengalami gaya Lorentz yang besarnya dirumuskan

$$F_L = q \cdot v \cdot B \sin \alpha \quad (3)$$

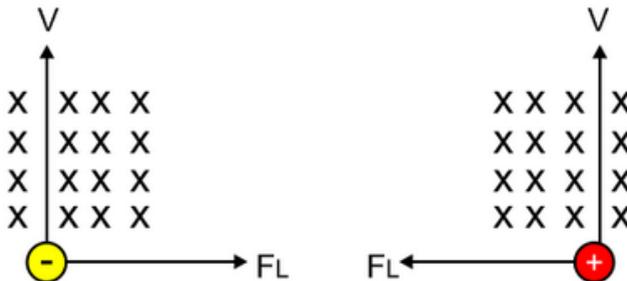
Dimana

q = muatan listrik (Coulomb)

v = kecepatan gerak muatan (m/s)

B = kuat medan magnet (T)

α = sudut yang dibentuk oleh v dan B



Gambar 4.4 Arah gaya Lorentz untuk muatan yang bergerak

Arah gaya Lorentz yang dialami partikel bermuatan q yang bergerak dalam sebuah medan magnet adalah tegak lurus dengan arah kuat medan magnet dan arah kecepatan benda bermuatan tersebut. Untuk menentukan arahnya perlu diperhatikan hal berikut

- Bila muatan q positif, maka arah v searah dengan I
- Bila muatan q negatif, maka arah v berlawanan dengan I
- Jika besarnya sudut antara v dan B adalah 90° (v tegak lurus dengan B) maka lintasan partikel bermuatan listrik akan berupa lingkaran, sehingga partikel akan mengalami gaya sentripetal yang besarnya sama dengan gaya Lorentz.

Dirumuskan:

$$\begin{aligned} FL &= Fs \\ q.v.B \sin 90^\circ &= m \frac{v^2}{R} \\ R &= \frac{mv}{qB} \end{aligned}$$

Dimana

- R = Jari-jari lintasan partikel (m)
m = massa partikel (kg)
v = kecepatan partikel (m/s)
B = kuat medan magnet (Tesla)

Contoh Soal 3.1

Sebuah kawat lurus vertikal membawa arus 5 A dengan gaya tarik sebesar $6 \times 10^{-4} \text{ Nm}^{-1}$ terhadap kawat kedua yang panjangnya 8 cm. Hitung besar dan arah arus yang mengalir pada kawat kedua !

Penyelesaian

- Gaya tarik untuk kawat kedua membawa arus dengan arah yang sama dengan kawat pertama

$$F = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi r} l$$

$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi r}$$

$$F 2\pi r = \mu_o I_1 I_2 l$$

$$I_2 = \frac{F}{l} \frac{r}{I_1} \frac{2\pi}{\mu_o}$$

$$I_2 = (6 \times 10^{-4}) \frac{(8 \times 10^{-2})}{5} \frac{2\pi}{4\pi \times 10^{-7}}$$

$$I_2 = (6 \times 10^{-4}) \frac{(8 \times 10^{-2})}{5} \frac{1}{2 \times 10^{-7}}$$

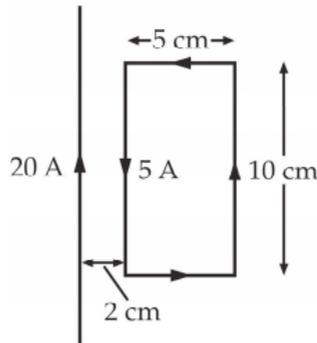
$$I_2 = \frac{48 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-7}}$$

$$I_2 = 48 \text{ A}$$

Jadi besar arus yang mengalir pada kawat kedua adalah sebesar 48 A

Contoh Soal 3.2

Sebuah kawat lurus membawa arus 20 A. Kawat berbentuk persegi panjang dengan dua pasang sisi sejajar masing-masing 5 cm dan 10 cm berada 2 cm dari kawat (perhatikan gambar).



Kawat tersebut membawa arus 5 A. Tentukan

- Gaya magnet pada setiap segmen dari kawat persegi panjang karena pengaruh arus pada kawat lurus
- Gaya total pada kawat

Penyelesaian

I_1 dan I_2 menunjukkan kuat arus sebesar 20 A dan 5 A, $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \vec{F}_4$ adalah gaya yang bekerja pada kawat horisontal di bagian atas loop, dan kawat yang lainnya membawa arus dengan arah searah jarum jam. $\vec{B}_1, \vec{B}_2, \vec{B}_3, \vec{B}_4$ adalah medan magnet pada kawat yang dipengaruhi arus I_1 . Arah sumbu x positif menuju arah kanan dan sumbu y positif menuju ke atas. Sebagai catatan bahwa hanya komponen-komponen yang berada di dalam ataupun di luar

kertas dari $\overline{B}_1, \overline{B}_2, \overline{B}_3, \overline{B}_4$ yang memberikan pengaruh untuk gaya $\overline{F}_1, \overline{F}_2, \overline{F}_3, \overline{F}_4$ masing-masing :

- a. Menunjukkan gaya \overline{F}_2 dan \overline{F}_4 dalam hubungan dengan I_2, \overline{B}_2 dan \overline{B}_4

Menunjukkan \overline{F}_2 dan \overline{F}_4

$$\overline{F}_2 = -I_2 l_2 \times \overline{B}_2 \hat{j}$$

Dan

$$\overline{F}_4 = I_2 l_4 \times \overline{B}_4 \hat{j}$$

Menunjukkan \overline{B}_2 dan \overline{B}_4

$$\overline{B}_2 = -\frac{\mu_o}{4\pi} \frac{2I_1}{R_2} \hat{k}$$

Dan

$$\overline{B}_4 = -\frac{\mu_o}{4\pi} \frac{2I_1}{R_4} \hat{k}$$

Persamaan \overline{B}_2 dan \overline{B}_4 kita substitusikan ke \overline{F}_2 dan \overline{F}_4

$$\overline{F}_2 = -I_2 l_2 \hat{j} \times \left(-\frac{\mu_o}{4\pi} \frac{2I_1}{R_2} \hat{k} \right)$$

$$\overline{F}_2 = \frac{\mu_o l_2 I_1 I_2}{2\pi R_2} \hat{i}$$

Dan

$$\overline{F}_4 = I_2 l_4 \hat{j} \times \left(-\frac{\mu_o}{4\pi} \frac{2I_1}{R_4} \hat{k} \right)$$

$$\overline{F}_4 = -\frac{\mu_o l_4 I_1 I_2}{2\pi R_4} \hat{i}$$

Substitusikan nilai masing-masing komponen

$$\bar{F}_2 = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2)(0,1\text{m})(20\text{A})(5\text{A})}{2\pi(0,02\text{m})} \hat{i}$$

$$\bar{F}_2 = \frac{20 \times 10^{-7}}{0,02}$$

$$\bar{F}_2 = (20 \times 10^{-7}) \left(\frac{100}{2} \right)$$

$$\bar{F}_2 = (10 \times 10^{-7}) (10^2)$$

$$\bar{F}_2 = (10^{-4} \text{ N}) \hat{i}$$

Sedangkan \bar{F}_4

$$\bar{F}_2 = -\frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2)(0,1\text{m})(20\text{A})(5\text{A})}{2\pi(0,07\text{m})} \hat{i}$$

$$\bar{F}_2 = -\frac{20 \times 10^{-7}}{0,07}$$

$$\bar{F}_2 = -(20 \times 10^{-7}) \left(\frac{100}{7} \right)$$

$$\bar{F}_2 = -\frac{20}{7} (10^{-7} \cdot 10^2)$$

$$\bar{F}_2 = (-2,86 \times 10^{-5} \text{ N}) \hat{i}$$

- b. Gaya total yang bekerja pada kawat

$$\bar{F}_{net} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2 + \bar{F}_3 + \bar{F}_4$$

Karena panjang segmen pertama dan ketiga namun arah arusnya berlawanan maka

$$\bar{F}_1 + \bar{F}_3 = 0$$

Jadi

$$\vec{F}_{net} = \vec{F}_2 + \vec{F}_4$$

Substitusikan nilai \vec{F}_2 dan \vec{F}_4 , sehingga kita peroleh :

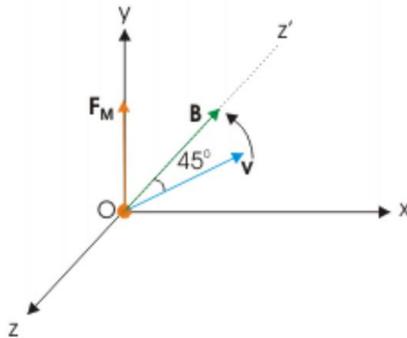
$$\vec{F}_{net} = 10^{-4} N - 2,86 \times 10^{-5} N$$

$$\vec{F}_{net} = (1 - 0,286) \times 10^{-4} N$$

$$\vec{F}_{net} = 0,714 \times 10^{-4} N$$

Contoh Soal 3.3

Sebuah partikel membawa muatan sebesar $1 \mu\text{C}$ bergerak di dengan kecepatan $3\mathbf{i} - 3\mathbf{k}$ dalam medan seragam $-5\mathbf{k}$. Dalam satuan SI, tentukan kecepatan sudut antara vektor kecepatan dan medan magnet serta besart gaya magnet.



Penyelesaian

- Cocinus sudut antara vektor kecepatan dan medan magnet :

$$\cos\theta = \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{v}| |\mathbf{B}|} = \frac{(3\mathbf{i} - 3\mathbf{k}) \cdot (-5\mathbf{k})}{|3\mathbf{i} - 3\mathbf{k}| |-5\mathbf{k}|}$$

$$\cos\theta = \frac{15}{15\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\theta = \arccos \frac{1}{\sqrt{2}} = 45^\circ$$

- Vektor kecepatan dan medan magnet dalam bidang $x - z$. Gaya magnetik adalah :

$$F_M = q(v \times B) = 1 \times 10^{-6} [(3\mathbf{i} - 3\mathbf{k}) \times (-5\mathbf{k})]$$

$$F_M = q(v \times B) = (1 \times 10^{-6})(15\mathbf{j})$$

$$F_M = 15 \times 10^{-6} \mathbf{j}$$

Contoh Soal 3.4

Sebuah proton diproyeksikan dalam arah x -positif dengan kecepatan 3 m/s dalam medan magnetik $(2\mathbf{i} + 3\mathbf{j}) \times 10^{-6} T$. Tentukan gaya yang dialami oleh partikel tersebut !

Penyelesaian

- Diketahui

$$v = 3\mathbf{i} \text{ m/s}$$

$$B = (2\mathbf{i} + 3\mathbf{j}) \times 10^{-6} T$$

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

- Gaya magnetik

$$F_M = q(v \times B)$$

$$F_M = 1,6 \times 10^{-19} [3\mathbf{i} \times (2\mathbf{i} + 3\mathbf{j}) \times 10^{-6}]$$

$$F_M = 1,6 \times 10^{-19} [9 \times 10^{-6}] \mathbf{k}$$

$$F_M = 1,44 \times 10^{-24} \mathbf{k} \text{ Newton}$$

Contoh Soal 3.5

Sebuah partikel membawa muatan sebesar $50 \mu C$ bergerak dengan kecepatan $v = 5\mathbf{i} + 3\mathbf{k} \frac{m}{s}$ bergerak melalui medan magnet seragam $\mathbf{B} = 9\mathbf{i} + 6\mathbf{j} T$. Tentukan gaya yang bekerja pada partikel tersebut !

Penyelesaian

- Gaya magnetik

$$F_M = q(v \times B)$$

$$F_M = (50 \mu C) \left[(5\mathbf{i} + 3\mathbf{k} \text{ m/s}) \times (9\mathbf{i} + 6\mathbf{j}) \right]$$

$$F_M = (50 \times 10^{-6}) \left[\begin{pmatrix} 5\mathbf{i} \\ 3\mathbf{k} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 9\mathbf{i} \\ 6\mathbf{j} \end{pmatrix} \right]$$

$$F_M = (50 \times 10^{-6}) \begin{bmatrix} i & j & k \\ 5 & 0 & 3 \\ 9 & 6 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_M = (50 \times 10^{-6}) [(27\mathbf{j} + 30\mathbf{k}) - (18\mathbf{i})]$$

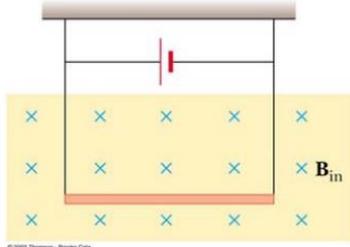
$$F_M = (1350\mathbf{j} + 1500\mathbf{k} - 900\mathbf{i}) \times 10^{-6}$$

$$F_M = (-900\mathbf{i} + 1350\mathbf{j} + 1500\mathbf{k}) \times 10^{-6} \text{ N}$$

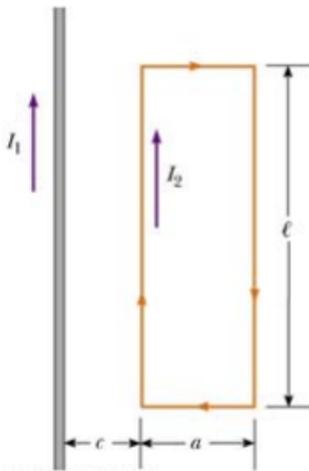
Evaluasi

1. Sebuah proton bergerak dengan kecepatan $3 \times 10^6 \text{ m/s}$ pada sudut 37° dengan arah medan magnetik pada sumbu y positif dengan kuat medan 0,3 T. Tentukan !
 - a. Besar gaya magnet yang bekerja pada proton
 - b. Percepatan proton
2. Sebuah proton bergerak tegak lurus untuk medan magnet seragam **B** dengan kecepatan $2 \times 10^7 \text{ m/s}$ dan mengalami percepatan sebesar $2 \times 10^{13} \text{ m/s}^2$ pada arah sumbu x positif ketika kecepatannya berada pada arah sumbu z positif. Tentukan besar gaya magnet dan arah gaya magnetnya !
3. Arus sebesar 15 A diarahkan sepanjang sumbu x positif dan tegak lurus terhadap medan magnet. Konduktor mengalami gaya magnet per satuan panjang 0,12 N/m arah y negatif. Hitung besarnya dan arah medan magnet !
4. Sebuah kawat sepanjang 75 cm dilalui arus sebesar 2,4 A dan terletak di sepanjang sumbu x dalam medan magnet seragam dengan kuat medan magnet 1,60 T pada arah z positif. Tentukan besar dan arah gaya magnet yang bekerja pada kawat tersebut?
5. Sebuah kawat membawa arus 10,0 A ke arah sudut 30° yang dipengaruhi oleh kuat medan magnet sebesar 0.300 T. Tentukan gaya magnet pada area sepanjang 5 m pada kawat !
6. Sebuah kawat dengan massa per satuan panjang 1,00 g/cm ditempatkan secara horizontal di sebuah permukaan kasar yang memiliki dengan koefisien gesek 0,2. Kawat tersebut membawa arus 1,50 A ke arah timur dan bergerak secara horizontal ke utara. Berapa besar dan arah untuk kuat medan magnet vertikal terkecil yang memungkinkan kawat bergerak dengan cara ini?

7. Sebuah konduktor tersusun oleh dua kabel fleksibel seperti yang ditunjukkan pada gambar yang memiliki massa per satuan panjang $0,04 \text{ kg/m}$. Berapakah arus yang harus melalui konduktor agar ketegangan kabel pendukung menjadi nol bila medan magnetnya $3,60 \text{ T}$ ke dalam dan pada arah mana arus tersebut bekerja.



8. Perhatikan Gambar !



Arus dalam kawat lurus panjang adalah $I_1 = 5 \text{ A}$, dan kawat terletak di bidang persegi panjang, yang membawa arus sebesar 10 A . Ukuran kawat tersebut adalah $c = 0.1 \text{ m}$, $a = 0.15 \text{ m}$, sedangkan $l = 0.45 \text{ m}$. Temukan besar dan arah gaya magnet yang diberikan oleh medan magnet karena kawat lurus pada loop.!

9. Kawat dengan berat per satuan panjang $0,080 \text{ N/m}$ digabungkan secara langsung di atas kawat kedua (menjadi sejenis kabel). Kabel

atas membawa arus 30 A, dan kabel bawah membawa arus 60 A. Tentukan jarak pemisahan antara kabel sehingga kabel atas tepat akan mendapatkan gaya tolakan magnetis !

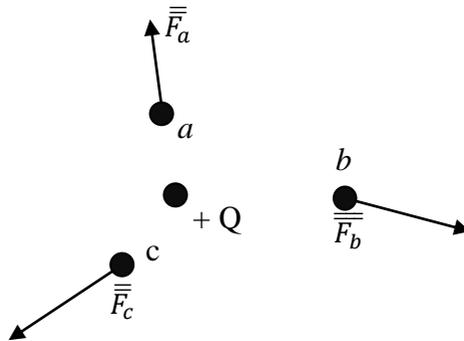
10. Batang tembaga tipis dan horisontal yang panjangnya 1,00 m dan memiliki massa 50,0 g. Berapakah arus minimum yang bekerja pada batang yang dapat menyebabkan batang mengambang di medan magnet horisontal 2 T?

4 **Flusk Listrik dan Hukum Gauss**

4.1 Medan Listrik

Medan listrik sering juga di pakai istilah kuat medan listrik atau intensitas medan listrik. Medan Listrik merupakan daerah atau ruang di sekitar benda yang bermuatan listrik di mana jika sebuah benda bermuatan lainnya diletakkan pada daerah itu masih mengalami gaya elektrostatis. Sedangkan gaya listrik adalah gaya yang dialami oleh obyek bermuatan yang berada dalam medan listrik. Rumusan gaya listrik kadang sering dipertukarkan dengan hukum Coulomb, padahal gaya listrik bersifat lebih umum ketimbang hukum tersebut, yang hanya berlaku untuk dua buah muatan titik. Dari kedua definisi tersebut, maka dapat dikatakan bahwa secara matematis, kuat medan

listrik di suatu titik adalah adalah gaya yang dialami oleh suatu muatan percobaan yang di letakkan di titik itu dibagi oleh besar muatan percobaan tersebut. Perhatikan Gambar 2.1



Gambar 3.1 Muatan-muatan Listrik

Gaya yang dialami oleh muatan-muatan positif percobaan di berbagai titik akibat muatan Q dapat dilihat dalam Gambar 2-1, secara matematis dinyatakan dengan:

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

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \frac{1}{q} \hat{r}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{r} \tag{1}$$

Persamaan (1) adalah persamaan medan listrik yang di timbulkan oleh satu muatan titik. Jika di dalam ruang terdapat n muatan titik, maka medan listrik di suatu titik di dalam ruang itu adalah :

$$E = \bar{E}_1 + \bar{E}_2 + \dots + \bar{E}_n = \sum_{i=1}^n \bar{E}_i$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

Di sini

$$E_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{r_i^2} \hat{r}_i \quad (2)$$

adalah medan listrik yang di timbulkan oleh muatan ke i .

Jika muatannya terbagi secara kontinyu, maka medan listrik yang ditimbulkan oleh elemen muatan dQ adalah :

$$d\bar{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dQ}{r^2} \hat{r} \quad (3)$$

Dan

$$\bar{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dQ}{r^2} \hat{r} \quad (4)$$

Adalah besar medan listrik di titik itu.

4.2 Gerak Partikel Bermuatan dalam Medan Listrik

Partikel bermuatan q dalam medan listrik E mengalami gaya F seperti dinyatakan dalam persamaan (2-1).

$$\bar{F} = q\bar{E} \quad (5)$$

Arah gaya F di sini di tentukan oleh muatan q . Jika muatan q positif, gaya F sejajar dengan medan listrik E dan sebaliknya jika negatif, arah gaya F akan berlawanan. Menurut hukum Newton, partikel bermuatan dalam medan listrik tersebut akan memperoleh percepatan sebesar:

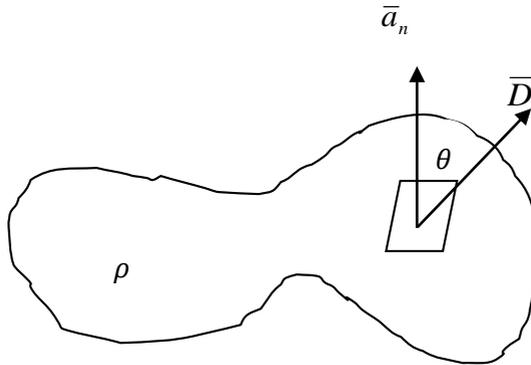
$$a = \frac{F}{m} = \frac{qE}{m} \quad (6)$$

4.3 Fluks Listrik

Fluks listrik didefinisikan sebagai jumlah garis gaya yang menembus permukaan yang saling tegak lurus. Dengan demikian muatan satu coulomb akan menimbulkan fluks listrik satu coulomb. Dalam kalimat matematis dituliskan

$$\phi = Q \text{ coulomb} \tag{7}$$

Jika fluks (ϕ) adalah besaran skalar, maka kerapatan fluks listrik (*density of electric flux*) D adalah medan vektor. Gambar di bawah memperlihatkan distribusi muatan ruang, kerapatan muatan ρ yang ditutupi oleh permukaan S . Maka untuk elemen kecil permukaan ds , diperoleh differensial fluks yang menembus, sebagai berikut:



Gambar 3.2. Elemen fluks listrik

Ini karena D tidak selalu dalam arah normal terhadap permukaan dan misalkan θ adalah sudut antara \bar{D} dengan normal permukaan dan $d\bar{s}$ adalah vektor elemen permukaan yang mempunyai arah \bar{a}_n (normal).

Persamaan (7) dimana dijelaskan bahwa fluks listrik sebesar q coulomb dipancarkan dari suatu permukaan tertutup seluas s , dimana didalamnya mengandung muatan listrik sebesar q coulomb. Besarnya fluks listrik (ϕ) yang dipancarkan dari suatu luasan permukaan tertutup ini dijelaskan oleh hukum Gauss, dimana secara matematis dituliskan

$$\phi_E = \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = q \text{ coulomb} \tag{8}$$

Dengan

\mathbf{D} = vektor rapat fluks listrik = $\epsilon\mathbf{E}$ (C/m²)

\mathbf{E} = vektro intensitas medan listrik (V/m)

$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r =$ permitivitas dielektrik medium (F/m)
 $\epsilon_r =$ permitivitas relatif (tidak memiliki dimensi)

Berdasarkan definisi muatan q coulomb yang menempati volume V , dengan kerapatan muatan ruang q_v yang terdistribusi secara merata, diberikan oleh :

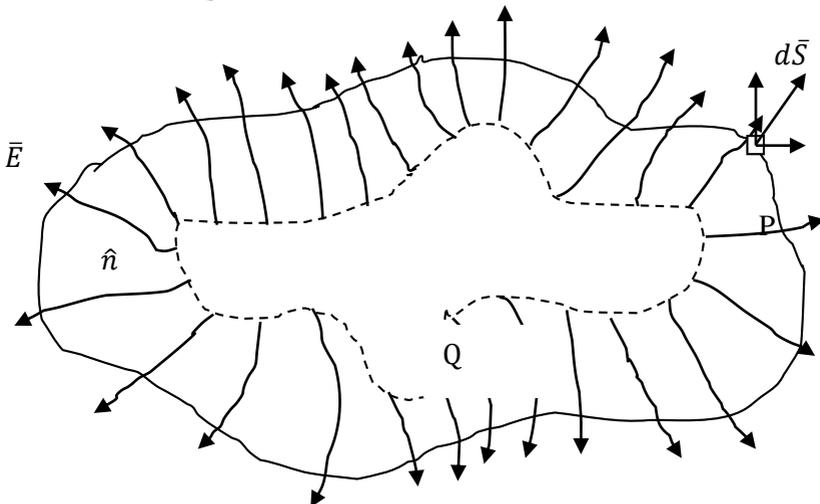
$$q = \int_V q_v dV \quad (9)$$

Dengan substitusi persamaan (9) ke persamaan (8) maka diperoleh :

$$\phi_E = \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \int_{V=\text{volume}} q_v dV \quad (10)$$

4.4 Hukum Gauss

Sebelumnya kita telah mempelajari tentang pengertian **Fluks Listrik**. Dalam Gambar 2.3 merupakan gambaran yang lebih besar mengenai fluks listrik. Q menyatakan jumlah aljabar muatan-muatan (positif dan negatif) yang terdistribusi ke seluruh ruang. Garis putus-putus menunjukkan suatu permukaan S dalam ruang yang melingkupi seluruh muatan Q .



Gambar 3.3 Fluks Listrik

Fluks listrik yang menembus elemen luas ds di definisikan sebagai.

$$d\phi = \bar{E} \cdot d\bar{s} (N \cdot m^2 / C) \quad (11)$$

Fluks listrik total yang menembus permukaan S keluar adalah:

$$\phi = \oint_S \bar{E} \cdot d\bar{s} (N \cdot m^2 / C) \quad (12)$$

Disini $d\bar{s} = \hat{n} ds$ adalah elemen vektor luas di P dan simbol \oint menyatakan integral pada seluruh permukaan tertutup S . Fluks listrik yang menembus suatu bidang tepat sama dengan jumlah garis gaya yang melalui permukaan bidang itu, maka jumlah garis gaya N adalah :

$$N = \phi \quad (13)$$

Hubungan antara fluks listrik yang menembus suatu permukaan tertutup dengan muatan Q di dalamnya, dinyatakan oleh hukum Gauss,

$$\oint_S \bar{E} \cdot d\bar{s} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (14)$$

Dengan demikian, fluks listrik total yang keluar suatu permukaan tertutup dalam ruang sebanding dengan muatan listrik netto di dalamnya.

4.5 Teorema Divergensi

Operator *del* ∇ didefinisikan sebagai operator vektor derivatif

$$\nabla = \mathbf{a}_x \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{a}_y \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{a}_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (15)$$

Divergensi vektor D , ditulis $\text{div } D$, adalah produk skalar antara operator vektor derivatif dan vektor D

$$\begin{aligned} \text{Div } \mathbf{D} = \nabla \cdot \mathbf{D} &= \left(\mathbf{a}_x \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{a}_y \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{a}_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot (D_x \mathbf{a}_x + D_y \mathbf{a}_y + D_z \mathbf{a}_z) \\ &= \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} \end{aligned} \quad (16)$$

Teorema divergensi menurut teori kalkulus adalah mengubah bentuk integral luas menjadi bentuk integral volume:

$$\oint_{S=\text{luas}} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_{V=\text{volume}} \nabla \cdot \mathbf{D} dV \quad (17)$$

Sisi kiri persamaan (16) dapat ditulis

$$\oint_{S=\text{luas}} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \iint d\mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} \quad (18)$$

Dimana

$$d\mathbf{D} = \frac{\partial D_x \mathbf{a}_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y \mathbf{a}_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z \mathbf{a}_z}{\partial z} \text{ dan}$$

$$d\mathbf{S} = dydz\mathbf{a}_x + dxdz\mathbf{a}_y + dxdy\mathbf{a}_z$$

Maka persamaan (17) dapat ditulis menjadi

$$\oint_{S=\text{luas}} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \iint \left(\frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} \right) dxdydz$$

$$\oint_{S=\text{luas}} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_{V=\text{volume}} \nabla \cdot \mathbf{D} dV \quad (19)$$

Dari persamaan (10) dan (17) diperoleh :

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q_v \quad (20)$$

Persamaan (20) menjelaskan bahwa divergensi vektor rapat fluks listrik \mathbf{D} adalah fluks listrik total yang dipancarkan per satuan volume benda yang memancarkan fluks tersebut. Jika dibuat dalam bentuk tiga dimensi, persamaan (20) menjadi:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = q_v \quad (21)$$

(untuk sistem koordinat kartesian)

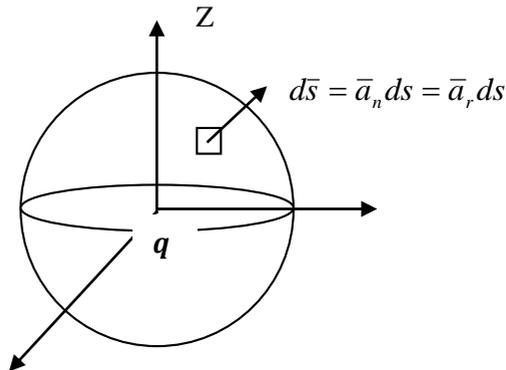
$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \frac{\partial \rho D_\rho}{\rho \partial \rho} + \frac{\partial \rho D_\phi}{\rho \partial \phi} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = q_v \quad (22)$$

(untuk sistem koordinat silinder)

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \frac{\partial r^2 D_r}{r^2 \partial r} + \frac{\partial \sin \theta D_\theta}{r \sin \theta \partial \theta} + \frac{\partial D_\phi}{r \sin \theta \partial \phi} = q_v \quad (23)$$

(untuk sistem koordinat bola)

4.6 Hubungan Antara Kerapatan Flux dan Kuat Medan Listrik



Gambar 3.4 Koordinat bola

Kita perhatikan pada gambar 3.4. Pandang suatu muatan q positif yang terletak di pusat bola yang berjari-jari r , dari definisi garis

gaya yang terjadi akibat muatan Q ini akan menuju tak hingga (\sim) sehingga $\vec{D} = \hat{a}_r D$ (berarah keluar sesuai dengan arah \hat{a}_r).

Untuk menyelesaikan kasus tersebut, gunakan hukum Gauss,

$$Q = \oiint \vec{D} \cdot d\vec{s} = \oiint \hat{a}_r D \cdot \hat{a}_r r^2 \sin \theta d\theta d\varphi \quad (24)$$

Dimana \hat{a}_r dan \hat{a}_n sejajar sehingga $\hat{a}_r \cdot \hat{a}_n = 1$

Untuk permukaan bola $\theta = 0$ s/d π

$\varphi = 0$ s/d 2π

Sehingga $Q = 4\pi r^2 D$

$$D = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

$$\vec{D} = \frac{Q}{4\pi r^2} \hat{a}_r$$

Seperti kita tahu bahwa intensitas medan listrik radial oleh sebuah muatan titik di pusat bola dalam vakum adalah :

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0 \cdot r^2} \quad (25)$$

Maka $\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E}$ berlaku untuk ruang vacuum dan umumnya untuk setiap medium yang mempunyai permitivitas listrik $\epsilon \rightarrow D = \epsilon \cdot E$.

4.7 Pemakaian Hukum Gauss

Hukum Gauss $Q = \oiint D \cdot d\vec{s}$

Pemecahannya akan mudah jika dipilih permukaan tertutup yang memenuhi syarat sebagai berikut:

- D_s normal terhadap permukaan sehingga $\vec{D}_s \cdot d\vec{s} = D_s ds$
- Menyinggung permukaan sehingga $\vec{D}_s \cdot d\vec{s} = 0$
- Pada harga $\vec{D}_s \cdot d\vec{s} \neq 0$, D_s adalah suatu konstanta.

Contoh penggunaan Hukum Gauss adalah untuk menghitung intensitas medan listrik yang ditimbulkan oleh suatu muatan listrik q atau muatan garis q_L di sekitar muatan tersebut.

4.8 Intensitas Medan Listrik oleh Muatan Titik

Besarnya intensitas medan listrik yang dihasilkan muatan listrik q pada suatu posisi yang berjarak r dari muatan tersebut dan berada di dalam ruangan yang memiliki permitivitas dielektrik ϵ dapat diperoleh dengan cara menurunkannya dari hukum Gauss.

$$\phi_E = \oint_{S=\text{luas}} \epsilon \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = q \quad (26)$$

dimana

\mathbf{E} = vektor intensitas medan listrik arah radial = $E\mathbf{a}_r$,

$d\mathbf{S}$ = vektor elemen luas kulit bola pada jarak r dari pusat bola
 $= r d\theta \cdot r \sin \theta d\phi \mathbf{a}_r$

Dengan substitusi nilai \mathbf{E} dan $d\mathbf{S}$ maka Hukum Gauss untuk persamaan (26) menjadi

$$\int_{\theta=0}^{\theta=180} \int_{\phi=0}^{\phi=180} \epsilon E \mathbf{a}_r \cdot r d\theta \cdot r \sin \theta d\phi \mathbf{a}_r = q \quad (27)$$

atau

$$\epsilon E r^2 (-\cos \theta)_0^{180^\circ} (\phi)_0^{2\pi} = q; \quad E = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2}$$

4.9 Intensitas Medan Listrik oleh Muatan Garis

Intensitas medan listrik yang ditimbulkan oleh muatan garis q_L yang terdistribusi merata di sepanjang kawat lurus, pada suatu posisi yang berjarak ρ dari kawat, dapat dihitung dengan hukum Gauss melalui sistem koordinat silinder

$$\phi_E = \oint_{S=\text{luas}} \epsilon \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = q \quad (26)$$

dimana

$$\mathbf{E} = E\mathbf{a}_\rho$$

$$d\mathbf{S} = \rho d\phi dz \mathbf{a}_\rho$$

atau

$$\int_0^{2\pi} \int_0^L \varepsilon E \rho d\phi dz = q$$

$$\varepsilon E \rho (2\pi)(L) = E$$

Vektor intensitas medan listrik

$$\mathbf{E} = \frac{q_L}{2\pi\varepsilon\rho} \mathbf{a}_\rho \quad (27)$$

4.10 Kabel Koaksial

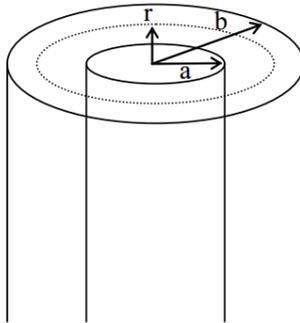
Kita pilih permukaan Gauss yang memenuhi syarat yaitu permukaan tabung dengan panjang L dan jari-jari $a < r < b$.

Dari hukum Gauss,

$$Q = \oiint \bar{D} \cdot d\bar{s} \quad (28)$$

Sehingga

$$Q = D_s (2\pi r L) \Rightarrow D_s = \frac{Q}{2\pi r L} \quad (29)$$



Gambar 3.5 Gambar penampang kabel koaksial

Muatan total pada konduktor dalam ($r = a$) dengan panjang L

$$Q = \int_{z=0}^L \int_{\phi=0}^{2\pi} \rho_s a \cdot d\phi \cdot dz = 2\pi \cdot aL\rho_s$$

Sehingga

$$D_s = \frac{a}{r} \rho_s \text{ atau } \bar{D}_s = \frac{a}{r} \rho_s \hat{a}_r \quad (a < r < b)$$

Contoh Soal 4.1

Muatan titik di pusat koordinat bola, kita pilih permukaan tertutup yang memenuhi kedua syarat tersebut, yaitu permukaan bola yang pusatnya di pusat koordinat dan jari-jarinya r .

Penyelesaian

Arah D_s di setiap titik pada permukaan adalah normal terhadap permukaan tersebut, dan besar D_s di setiap titik adalah sama.

$$\begin{aligned} Q &= \oint_S \bar{D}_s \cdot d\bar{s} \\ &= \oint_S \bar{D}_s \cdot ds = D_s \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} r^2 \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi \\ &= D_s \cdot 4\pi r^2 \end{aligned}$$

Atau

$$D_s = \frac{Q}{4\pi r^2}$$

Karena harga r diambil sembarang.

D_s mempunyai arah radial keluar, maka

$$D = \frac{Q}{4\pi r^2} \hat{a}_r$$

Contoh Soal 4.2

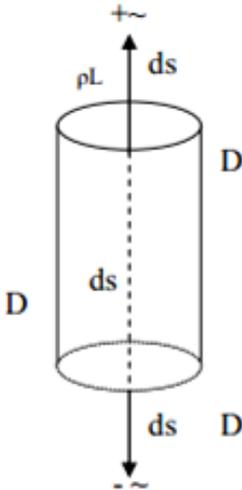
Tinjau distribusi muatan garis dengan kerapatan muatan serba sama ρD . Misalkan distribusi muatan tersebut memanjang sepanjang sumbu z dari $(-\infty)$ ke (∞) .

Penyelesaian

Kita pilih permukaan tertutup yang memenuhi kedua syarat tersebut, yaitu permukaan silinder. Besar \bar{D} tetap dan arahnya selalu tegak lurus terhadap permukaan silinder di setiap titik pada permukaan tersebut, sehingga:

$$\begin{aligned} Q &= \oiint \bar{D} \cdot d\bar{s} \\ &= \iint \bar{D} \cdot d\bar{s}_1 + \iint \bar{D} \cdot d\bar{s}_2 + \iint \bar{D} \cdot d\bar{s}_3 \end{aligned}$$

Karena untuk tutup atas dan bawah $\bar{D}_s \perp d\bar{s}$ sehingga harga $\bar{D}_s \cdot d\bar{s} = 0$



$$\begin{aligned} Q &= D \int_{z=0}^{z=L} \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} r d\varphi \cdot dz \\ &= D 2\pi r l \Rightarrow Q = \rho_1 \cdot l \end{aligned}$$

maka

$$\bar{D} = \frac{\rho}{2\pi r} \hat{a}_r$$

Contoh Soal 4.3

Tentukan kerapatan muatan ruang q_v di titik $P(3, 4, 5)$ m untuk masing-masing vektor rapat fluks listrik di bawah ini !

a. $\mathbf{D} = \frac{\mathbf{a}_x}{x^2} + \frac{\mathbf{a}_y}{y^2} + \frac{\mathbf{a}_z}{z^2} \mu\text{C} / \text{m}^2$

b. $\mathbf{D} = \frac{\mathbf{a}_\rho}{\rho^2} \mu\text{C} / \text{m}^2$

c. $\mathbf{D} = \frac{\mathbf{a}_r}{r^2} \mu\text{C} / \text{m}^2$

Penyelesaian

a. $q_v = \nabla \cdot \mathbf{D} = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z}$

$$q_v = -\frac{2}{x^3} - \frac{2}{y^3} - \frac{2}{z^3}$$

$$q_v = \left(-\frac{2}{27} - \frac{2}{64} - \frac{2}{125} \right) \times 10^{-6} \text{C} / \text{m}^3 = -0,121 \mu\text{C} / \text{m}^3$$

b. $q_v = \nabla \cdot \mathbf{D} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho D_\rho}{\partial \rho} = -\frac{1}{\rho^3}$

$$q_v = \frac{1}{\left(\sqrt{3^2 + 4^2} \right)^3} \mu\text{C} / \text{m}^2$$

$$q_v = \frac{1}{125} \mu\text{C} / \text{m}^2$$

$$c. \quad q_v = \nabla \cdot \mathbf{D} = -\frac{1}{F^2} \frac{\partial r^2 D_r}{\partial r} \quad (\text{sistem koordinat bola satu dimensi})$$

$$q_v = -\frac{1}{F^2} \frac{\partial r^2 D_r}{\partial r}$$

$$q_v = \frac{1}{r^2} \frac{dr \cdot \frac{1}{(r)^2}}{dr} = 0$$

Contoh Soal 4.4

Jika diketahui muatan titik $q = 50 \mu\text{C}$ di $O(0, 4, 0)$ m, muatan garis $q_1 = 100 \text{ nC/m}$ terdistribusi merata di sepanjang kawat lurus yang berimpit dengan sumbu $-x$, dan muatan permukaan $q_s = 75 \text{ nC/m}^2$ terdistribusi merata pada permukaan pelat datar logam yang berimpit bidang $z = 0,5$ m di udara bebas !

- Tentukan vektor intensitas medan listrik di titik $P(0, 0, 5)$ m
- Tentukan vektor rapat fluks listrik \mathbf{D} di titik $P(0, 0, 5)$ m

Penyelesaian

$$\begin{aligned} a. \quad \mathbf{E}_1 &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} \mathbf{r} \\ &= (9 \times 10^9) (50 \times 10^{-6}) \frac{(-4\mathbf{a}_y + 5\mathbf{a}_z)}{41(41)^{1/2}} \text{ V/m} \\ &= -6,856\mathbf{a}_y + 8,57\mathbf{a}_z \text{ kV/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_2 &= \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0 \rho^2} \rho \quad \rho = 5\mathbf{a}_z \text{ m} \\ &= (18 \times 10^9) (100 \times 10^{-9}) \frac{5\mathbf{a}_z}{25} \text{ V/m} \\ &= 0,36\mathbf{a}_z \text{ kV/m} \end{aligned}$$

$$\mathbf{E}_3 = \frac{q_s}{2\epsilon_0} \mathbf{a}_z$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{75 \times 10^{-9}}{2(8,854 \times 10^{-12})} \mathbf{a}_z \\
&= 4,235 \mathbf{a}_z \text{ kV/m}
\end{aligned}$$

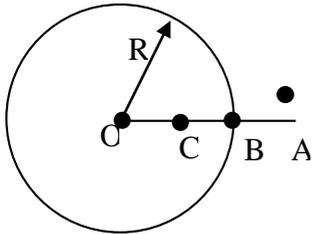
$$\begin{aligned}
\mathbf{E}_{total} &= \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 \\
&= (-6,856 \mathbf{a}_y + 8,57 \mathbf{a}_z) + (0,36 \mathbf{a}_z) + (4,235 \mathbf{a}_z) \\
&= -6,856 \mathbf{a}_y + 13,165 \mathbf{a}_z \text{ kV/m}
\end{aligned}$$

b. Vektor rapat fluks listrik di titik $P(0, 0, 5)\text{m}$

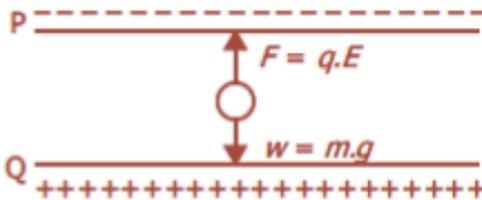
$$\begin{aligned}
\mathbf{D} &= \varepsilon_0 \mathbf{E} \\
&= 8,854 \times 10^{-12} (-6,856 \mathbf{a}_y + 13,165 \mathbf{a}_z) \times 10^3 \text{ C/m}^2 \\
&= -60,7 \mathbf{a}_y + 116,6 \mathbf{a}_z \text{ nC/m}^2
\end{aligned}$$

Evaluasi

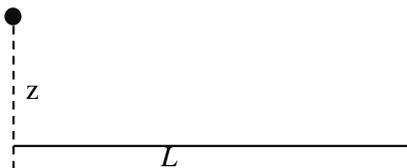
1. Bola konduktor dengan jari-jari 10 cm bermuatan listrik 500 μC . Titik A, B, dan C terletak segaris terhadap pusat bola dengan jarak masing-masing 12 cm, 10 cm, dan 8 cm terhadap pusat bola. Hitunglah kuat medan listrik di titik A, B, dan C!



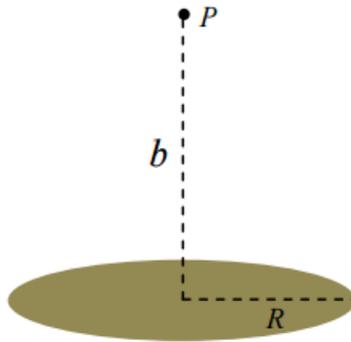
2. Sebuah bola kecil bermuatan listrik 10 μC berada di antara keping sejajar P dan Q dengan muatan yang berbeda jenis dengan rapat muatan $1,77 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$. Jika $g = 10 \text{ m/s}^2$ dan permitivitas udara adalah $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$, hitung massa bola tersebut!



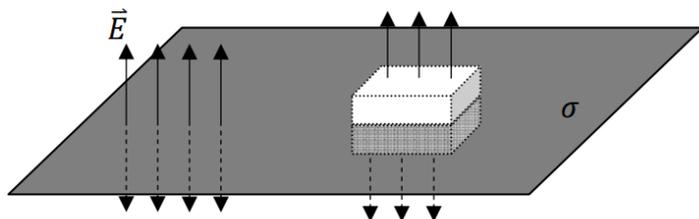
3. Tentukan medan listrik pada jarak z di atas salah satu ujung kawat sepanjang L yang membawa muatan berdistribusi seragam dengan rapat muatan λ , seperti gambar berikut ini !



4. Tentukan medan listrik pada jarak b di atas pusat pelat lingkaran dengan jari-jari R yang membawa rapat muatan permukaan seragam σ , seperti gambar berikut ini !

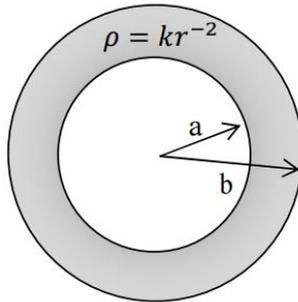


5. Tentukan kuat medan di dalam dan di luar selimut bola dengan jari-jari R dan bermuatan Q !
6. Gunakan hukum Gauss untuk menghitung medan listrik pada bidang luas sekali yang membawa muatan permukaan seragam σ !



7. Tentukan medan listrik pada titik P yang berjarak z dari kawat panjang sekali yang bermuatan seragam, dengan rapat muatan λ .

8. Bola bermuatan berlubang di bagian tengahnya seperti gambar di bawah. Jika rapat muatan yang dimiliki bola pada daerah $a \leq r \leq b$, adalah $\rho = kr^{-2}$ maka tentukan medan listrik pada daerah :
- $r \leq a$
 - $a \leq r \leq b$, dan
 - $r \geq b$



5 Potensial Listrik

Kerja yang harus dilakukan oleh gaya luar F terhadap medan listrik E untuk memindahkan muatan q dari titik a ke titik b sejauh $d\vec{e}$ adalah

$$dW = -\vec{F} \cdot d\vec{e} = -q\vec{E} \cdot d\vec{e} \quad (1)$$

Jumlah kenaikan energi potensial listriknya adalah

$$\Delta U = U_b - U_a = -\int_a^b q\vec{E} \cdot d\vec{e} = W_{ab} \quad (2)$$

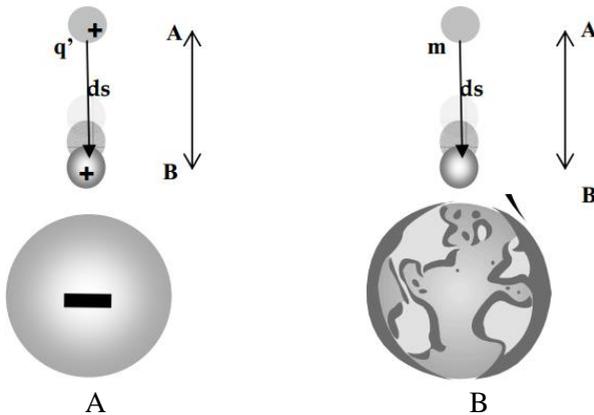
Jika dimisalkan titik a terletak di titik yang tak terhingga jauhnya maka $V_a = 0$ dan energi potensial di titik b adalah;

$$U_b = - \int_a^b \vec{q} \cdot \vec{E} \cdot d\vec{e} \quad (3)$$

di sini tanda minus menunjukkan bahwa gaya luar F besarnya sama dengan gaya listrik yang melawarnya, dan muatan percobaan q diambil sangat kecil.

5.1 Energi Potensial Listrik

Energi potensial listrik didefinisikan sebagai usaha (kerja) yang diperlukan untuk memindahkan muatan q dari suatu titik A ke titik B. Guna memahami makna dari energi potensial listrik dan potensial listrik secara fisis, maka kita dapat menganalogikan terhadap energi potensial gravitasi.



Gambar 5.1 Analogi potensial listrik dan potensial gravitasi

Gambar A menunjukkan sebuah muatan listrik yang berpindah dari titik A ke B dalam medan listrik E (dari muatan q), dimana perpindahan tersebut memerlukan sejumlah usaha yang berasal dari medan listrik muatan negatif. Sedangkan gambar B menunjukkan bahwa sebuah benda jatuh dari posisi A yang memiliki potensial lebih besar dibandingkan posisi B. Benda bermassa m memerlukan sejumlah usaha yang berasal dari medan gravitasi.

Energi potensial di B lebih kecil dari energi potensial di A karena jarak B dari muatan sumber (-) lebih dekat, maka benda akan jatuh dari posisi A ke posisi B. Demikian pula halnya analoginya dalam energi potensial listrik, di mana muatan negatif dianggap sebagai bumi dan muatan positif sebagai benda yang jatuh (atau sebaliknya). Muatan positif q "jatuh" dari energi potensial lebih tinggi di A ke energi potensial lebih rendah di B. Sehingga dengan demikian telah terjadi pengurangan energi potensial akibat usaha yang dilakukan pada muatan positif untuk berpindah. Berdasarkan ilustrasi tersebut dapat dituliskan dalam persamaan :

$$W = \int_{rA}^{rB} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \quad (1)$$

Karena $\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E}$, maka persamaan (1) menjadi :

$$W = - \int_{rA}^{rB} q \cdot \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -q \int_{rA}^{rB} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (2)$$

Jika persamaan (2) diselesaikan maka dapat diselesaikan :

$$W = -q \mathbf{E} \cdot \mathbf{r} \Big|_{rA}^{rB}$$

$$W = -qk \frac{q}{r^2} r \Big|_{rA}^{rB}$$

$$W = -q \left(k \frac{q}{r_B} - k \frac{q}{r_A} \right) \quad (3)$$

Dengan mendefinisikan $k \frac{q}{r}$ sebagai potensial listrik, maka persamaan (3) menjadi :

$$W = -q(V_B - V_A) \quad (4)$$

Dimana:

W = Energi potensial listrik (Joule)

q = muatan listrik (Coulomb)

V_B = potensial listrik di titik B (Volt)

V_A = potensial listrik di titik A (Volt)

5.2 Potensial Listrik Akibat Muatan Titik Q

Medan listrik pada jarak r dari muatan titik tunggal Q besarnya adalah:

$$E = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

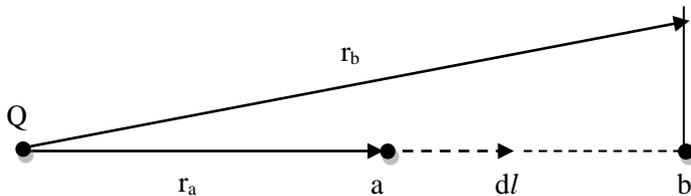
Beda potensial antara dua titik a dan b dalam medan listrik E menurut persamaan 3-5 adalah:

$$V_b - V_a = -\int_{r_a}^{r_b} \vec{E} \cdot d\vec{e} = -\frac{Q}{4\pi \epsilon_0} \int_{r_a}^{r_b} \frac{dr}{r^2}$$

$$E = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \left(\frac{Q}{r_b} - \frac{Q}{r_a} \right)$$

Untuk menghitung potensial listrik di suatu titik, biasanya di ambu $V_b = 0$ pada jarak $r_b = \infty$ dari muatan titik Q . (Gambar 3-1), maka potensial V pada jarak r dari muatan titik Q adalah

$$V = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{Q}{r} \quad (9)$$



Gambar 5.1

5.3 Potensial Dipole Listrik

Dua muatan titik Q yang sama besar dan berlawanan tanda terpisah sejauh t , disebut dipole listrik. Potensial listrik akibat dipole pada titik sembarang P seperti ditunjukkan Gambar 3-2 adalah:

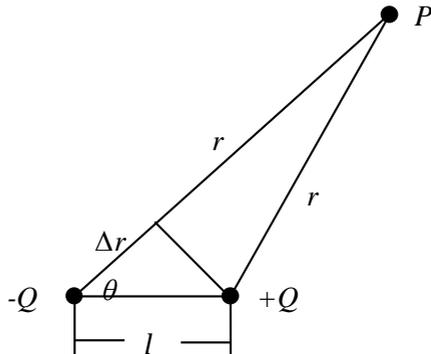
$$V = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \left(\frac{Q}{r} + \frac{(-Q)}{r + \Delta r} \right) = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r + \Delta r} \right) = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0} \frac{\Delta r}{r(r + \Delta r)}$$

disini r adalah jarak dari P ke muatan $+Q$ dan $r + \Delta r$ adalah jarak ke muatan $-Q$. Persamaan akan menjadi sederhana jika $r \gg \Delta r$, dengan demikian $r \gg \Delta r = l \cos \theta$ juga dan $r + \Delta r \approx r$

Potensial dipole listrik menjadi :

$$V = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{Ql \cos \theta}{r^2} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{p \cos \theta}{r^2} \quad (10)$$

disini $p = Ql$ disebut momen dipole. Jika $0 < \theta < 90^\circ$ maka V adalah positif dan V negatif jika $90^\circ < \theta < 180^\circ$



Gambar 5.2

5.4 Potensial Akibat Muatan Terdistribusi

Potensial listrik akibat muatan titik Q menurut persamaan 9 adalah

$$V = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

Dalam pembahasan di atas, kita telah memperoleh perumusan potensial listrik untuk muatan titik. Kasus yang lebih umum adalah jika muatan tidak lagi merupakan muatan titik, namun muatan kontinu. Muatan kontinu berarti muatan yang memiliki luas atau volume dan mempunyai kerapatan muatan tertentu yang biasanya diasumsikan merata (seragam). Misalnya saja jika dalam ruang ada N muatan titik, potensial listrik di suatu titik C adalah:

$$V_c = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i} \tag{11}$$

disini r_i adalah jarak muatan ke i (Q) ke titik C.

Jika muatannya merupakan benda bermuatan Q. maka potensial listrik di c adalah:

$$V = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \int \frac{dq}{r} \tag{12}$$

di sini r adalah jarak dari elemen muatan dq ke titik C.

5.5 Konsep Potensial Listrik dalam Kapasitor

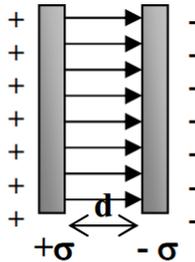
Kapasitor pada prinsipnya komponen elektronika yang terdiri dari dua buah konduktor (dalam hal ini berbentuk pelat) yang berlawanan muatan, masing-masing memiliki luas permukaan A, dan mempunyai muatan persatuan luas σ . konduktor yang dipisahkan oleh sebuah zat yang bersifat isolator atau dielektrik sejauh d.

Perhatikan Gambar 3.3. Karena kapasitor berbentuk pelat, maka jumlah medan diantara kedua pelat tersebut dapat dituliskan dengan :

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{A \cdot \epsilon_0} \tag{13}$$

Maka beda potensial antara kedua pelat adalah :

$$V_{ab} = V_a - V_b = E \cdot d = \frac{Qd}{A \cdot \epsilon_o} \quad (14)$$



Gambar 3.3 Kapasitor Pelat Terdiri Dari Dua Pelat Konduktor yang Berlawanan Muatan. Diantara kedua konduktor terdapat bahan dielektrik

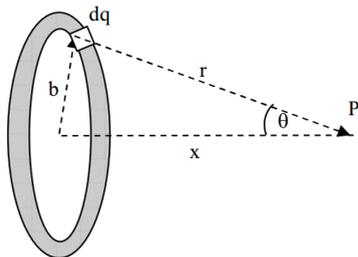
Ukuran Kapasitor biasanya dinyatakan dalam kapasitansi. Secara fisis kapasitansi C adalah seberapa banyak sebuah kapasitor dapat menampung/diisi oleh muatan. Dalam hal ini :

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \epsilon_o \frac{A}{d} \quad (15)$$

Satuan kapasitor dalam SI adalah Farad.

5.6 Potensial Listrik dari Cincin Bermuatan

Pandanglah sebuah cincin bermuatan dengan jari-jari b seperti gambar 3.4.



Gambar 3.4 Potensial dari sebuah cincin bermuatan

Jika kita hitung besarnya potensial pada titik P sejauh x dari pusat lingkaran cincin atau sejauh r dari sebuah elemen muatan dq, maka dengan menggunakan persamaan (12) di atas :

$$V = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \int \frac{dp}{r}$$

$$V = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \int \frac{dq}{\sqrt{b^2 + x^2}} \quad \text{Dimana } \frac{1}{4\pi \epsilon_0} = k$$

Maka

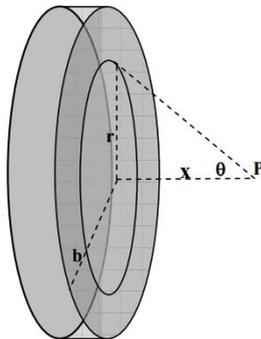
$$V = k \int \frac{dq}{\sqrt{b^2 + x^2}}$$

$$V = \frac{k}{\sqrt{b^2 + x^2}} \int dq$$

$$V = \frac{kq}{\sqrt{b^2 + x^2}} \tag{16}$$

5.7 Potensial dari Cakram Bermuatan

Pada kasus lain, yaitu potensial listrik pada titik P sejauh x dari pusat benda berbentuk cakram dengan jari-jari b seperti pada gambar 3.5



Gambar 3.5 Potensial listrik pada benda cakram

Kasus ini dapat dipandang sebagai penjumlahan dari muatan-muatan berbentuk cincin sebagaimana telah kita hitung di atas. Cincin-cincin ini jari-jarinya membesar mulai dari $r = 0$ hingga $r = b$ sehingga akhirnya membentuk cakram. Untuk itu kita tuliskan persamaan (16) dengan cincin berjari-jari r bermuatan dQ sebagai berikut :

$$dV = k \frac{dq}{\sqrt{r^2 + x^2}} \quad (17)$$

Dengan $dq =$ rapat muatan \times dengan luas cincin $= \rho (2\pi r \cdot dr)$
Medan akibat cincin ini kita integralkan dari $r = 0$ hingga $r = b$, sehingga :

$$V = k \int_0^b \frac{\rho 2\pi r dr}{\sqrt{r^2 + x^2}} = k\rho\pi \int_0^b \frac{2r dr}{\sqrt{r^2 + x^2}} \quad (18)$$

Penyelesaian persamaan (18) menggunakan kalkulus, dimana dilakukan dengan metode substitusi variabel :

$$u = r^2 + x^2 \text{ dan } du = 2r dr$$

$$V = k\rho\pi \int_0^b \frac{du}{\sqrt{u}} \text{ dan } du = 2r dr \text{ j}$$

$$V = k\rho\pi \int_0^b \frac{du}{\sqrt{u}}$$

$$V = k\rho\pi \int_0^b \frac{du}{u^{1/2}}$$

$$V = k\rho\pi (\sqrt{u}) \Big|_0^b \quad \text{karena } u = r^2 + x^2$$

$$V = k\rho\pi (\sqrt{r^2 + x^2}) \Big|_0^b$$

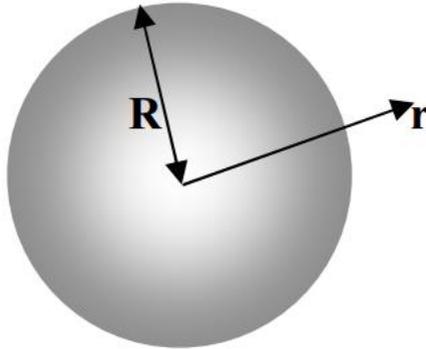
$$V = k\rho\pi (\sqrt{b^2 + x^2} - x) \quad (19)$$

Persamaan 19 merupakan persamaan untuk menghitung lagi potensial listrik pada cakram bermuatan.

5.8 Potensial dari Bola Kosong Bermuatan

a. Potensial Listrik Sejauh r dimana $r \geq R$

Kasus ketiga kita hitung potensial listrik dari sebuah bola berongga (kopong) bermuatan q dengan jari-jari R sejauh r dari pusat bola di mana $r \geq R$.



Gambar 3.6 Bola berongga bermuatan

Dalam bab sebelumnya kita telah menghitung medan listrik dari bola kosong bermuatan sejauh r yang hasilnya adalah:

$$\mathbf{E} = \frac{kq}{r^2} \hat{r} \tag{20}$$

dari hubungan antara potensial V dengan medan listrik E seperti persamaan (3) dalam bentuk diferensial berikut :

$$dV = -\mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} \tag{21}$$

Sehingga

$$V = -kq \int \frac{1}{r^2} \hat{r} d\hat{r} = -kq \int \frac{1}{r^2} dr = \frac{kq}{r} + C \tag{20}$$

dengan C adalah konstanta yang kita ambil bernilai nol, yaitu pada r yang sangat jauh sehingga diperoleh potensial listrik sejauh r adalah :

$$V = k \frac{q}{r} \tag{20}$$

b. Potensial Listrik Sejauh r dimana $r < R$

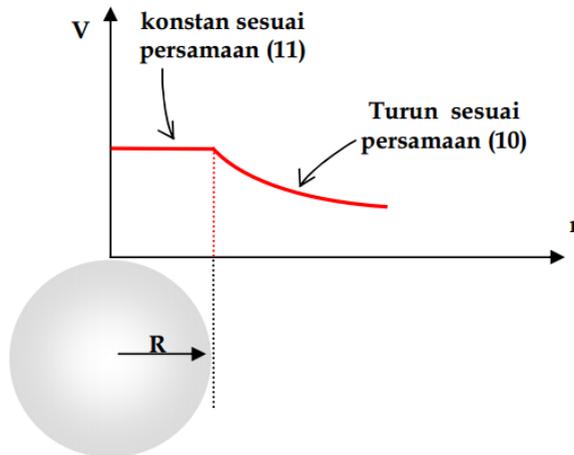
Untuk medan di dalam bola kosong telah kita hitung bahwa medan listriknya adalah nol, dengan demikian maka potensial listrik di dalam bola kosong adalah tetap, karena :

$$E = \frac{dV}{dr} = 0 \rightarrow V = \text{tetap}$$

Maka potensial listrik dinyatakan dengan persamaan

$$V = k \frac{q}{R} \quad (20)$$

Jika kita ilustrasikan potensial listrik di dalam dan diluar bola kosong bermuatan maka diperoleh :



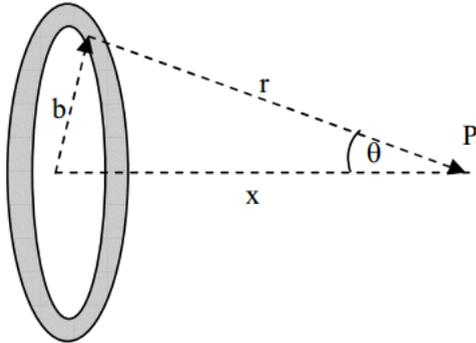
Gambar 5.7 Perubahan V pada Bola Berongga Bermuatan

Contoh Soal 5.1

Hitunglah potensial listrik dari sebuah cincin bermuatan dengan jari-jari 10 cm dengan muatan $15 \mu\text{C}$ pada jarak 50 cm tegak lurus dari pusat cincin !

Penyelesaian

- Perhatikan Gambar !



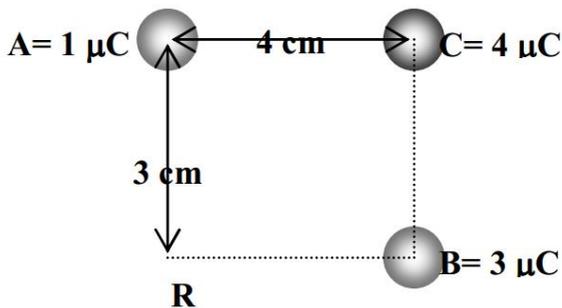
- Dari Persamaan (16)

$$V = \frac{kq}{\sqrt{b^2 + x^2}} = \frac{(9 \times 10^9)(15 \times 10^{-6})}{\sqrt{(10^{-1})^2 + (5 \times 10^{-1})^2}}$$

$$V = \frac{1,35 \times 10^5}{\sqrt{2,6 \times 10^{-1}}} = 2,65 \times 10^5 \text{ volt}$$

Contoh Soal 5.2

Perhatikan Gambar



Tentukan Potensial di titik R

Penyelesaian

$$V_A = k \frac{Q_A}{r_A} = 9 \times 10^9 \frac{10^{-6}}{3 \times 10^{-2}} = 3 \times 10^5 \text{ Nm/C}$$

$$V_B = k \frac{Q_B}{r_B} = 9 \times 10^9 \frac{3 \times 10^{-6}}{4 \times 10^{-2}} = 6,75 \times 10^5 \text{ Nm/C}$$

$$V_C = k \frac{Q_C}{r_C} = 9 \times 10^9 \frac{4 \times 10^{-6}}{5 \times 10^{-2}} = 7,2 \times 10^5 \text{ Nm/C}$$

Sehingga total potensial listrik adalah sebesar:

$$\begin{aligned} V_R &= 3 \times 10^5 \text{ Nm/C} + 6,75 \times 10^5 \text{ Nm/C} + 7,2 \times 10^5 \text{ Nm/C} \\ &= 16,95 \text{ Nm/C} \end{aligned}$$

Contoh Soal 5.3

Sebuah elektron dengan muatan $-1,6 \times 10^{-19}$ C dan massa $9,11 \times 10^{-31}$ kg semula dalam keadaan diam, sebuah beda potensial sebesar 30 kV kemudian bekerja padanya sehingga elektron bergerak. Hitunglah kecepatan elektron (dengan mengabaikan efek relativitas) !

Penyelesaian

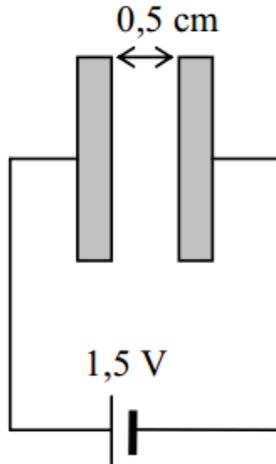
Karena terdapat beda potensial maka akan timbul energi sebesar qV yang kemudian terkonversi menjadi energi kinetik sehingga :

$$\begin{aligned} qV &= \frac{1}{2} mv^2 & v &= \sqrt{\frac{2qV}{m}} \\ v^2 &= \frac{qV}{\frac{1}{2}m} & &= \sqrt{\frac{2(1,6 \times 10^{-19})(3 \times 10^4)}{9,11 \times 10^{-31}}} \\ & & &= 1,03 \times 10^8 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Contoh Soal 5.4

Dua buah pelat logam terhubung dengan sebuah beda potensial baterai 1,5 V. Jika jarak antar pelat 0,5 cm, tentukan medan yang terjadi di antara kedua pelat tersebut!

Penyelesaian

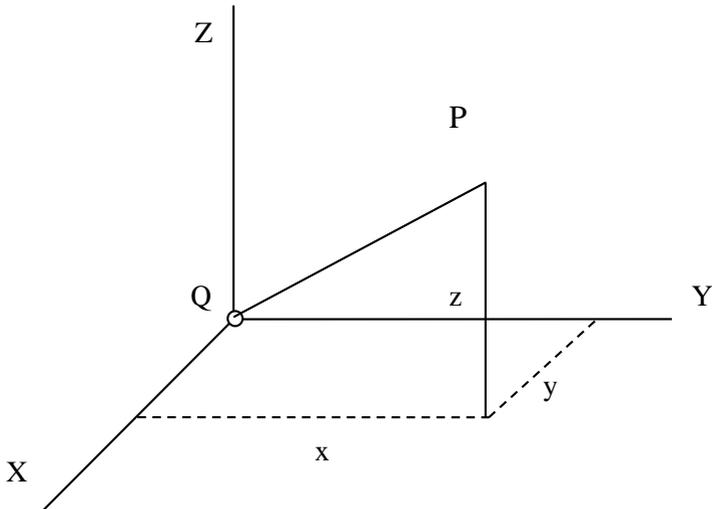


Dari persamaan dimana $\mathbf{E} = \frac{V}{r}$ maka:

$$\mathbf{E} = \frac{1,5}{5 \times 10^{-3}} = 300 \text{ V/m} = 300 \text{ N/C}$$

Contoh Soal 5.5

Muatan $Q = 40 \text{ nC}$ terletak pada pusat salib sumbu dan titik P pada posisi $x = 0,5 \text{ m}$, $y = 0,8 \text{ m}$, $z = 0,6 \text{ m}$.



Tentukan

- Tentukan potensial listrik di P
- Bila $q = 9 \mu\text{C}$ ditempatkan di P, hitunglah energi potensial listriknya.

Penyelesaian

- Disini $r = (0,5^2 + 0,8^2 + 0,6^2)^{1/2} = 1,118 \text{ m}$
Maka potensial di titik P

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} \\ &= (9 \times 10^9) \frac{(40 \times 10^{-6})}{1,118} \\ &= 3,22 \times 10^5 \text{ V} \end{aligned}$$

- b. Energi potensial di P

$$\begin{aligned}U &= qV \\ &= (9 \times 10^{-6})(3,22 \times 10^5) \\ &= 2,9 \text{ J}\end{aligned}$$

Contoh Soal 5.6

Suatu elektron dalam tabung gambar pesawat TV dipercepat dari keadaan awal diam dan beda potensial $V_{ba} = 5000 \text{ V}$.

- Berapa perubahan energi potensial elektron ?
- Berapa besar kecepatan elektron akibat percepatan ini ?

Penyelesaian

- a. Perubahan energi potensial yang terjadinya

$$\begin{aligned}V &= qV_{ba} \\ &= (-1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(5000 \text{ V}) \\ &= -8,0 \times 10^{-16} \text{ J}\end{aligned}$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa elektron ditarik dari elektroda negatif ke positif.

- b. Kecepatan elektron

Dengan menggunakan hukum kekekalan energi

$$\Delta KE = -\Delta U$$

$$\frac{1}{2}mv^2 - 0 = -qV_{ba}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = -qV_{ba}$$

$$v = \sqrt{\frac{-qV_{ba}}{\frac{1}{2}m}}$$

Maka

$$\begin{aligned}
 v &= \sqrt{\frac{-2qV_{ba}}{m}} \\
 &= \sqrt{\frac{-2(-1,6 \times 10^{19})(5000)}{9,1 \times 10^{-31}}} \\
 &= 4,2 \times 10^7 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Contoh Soal 5.7

Berapa besar kerja yang diperlukan untuk membawa muatan $q = 3,0 \mu\text{C}$ dari tempat yang jauh sekali ke titik $0,50 \text{ m}$ dari muatan $Q = 20,0 \mu\text{C}$?

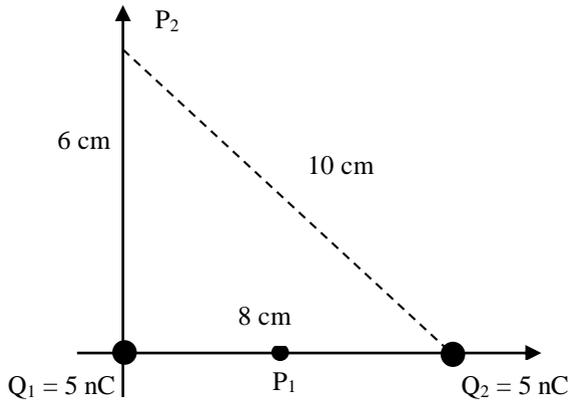
Penyelesaian

$$\begin{aligned}
 W &= qV_{ba} \\
 &= \frac{q}{4\pi\epsilon_o} \left(\frac{Q}{r_b} - \frac{Q}{r_a} \right) \\
 &= (3,0 \times 10^{-6} \text{ C}) \frac{(9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2) (20,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,5 \text{ m})} \\
 &= 1,08 \text{ J}
 \end{aligned}$$

Disini $r_b = 0,5 \text{ m}$ dan $r_a = \infty$

Evaluasi

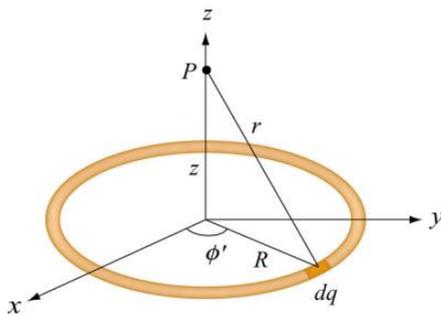
1. Perhatikan Gambar



Jika titik P berada tepat di tengah – tengah kedua muatan, tentukan :

- Potensial listrik pada titik P_1 pada sumbu x di $x = 4$ cm
- Potensial listrik pada titik P_2 pada sumbu y di $y = 4$ cm

2. Perhatikan gambar!



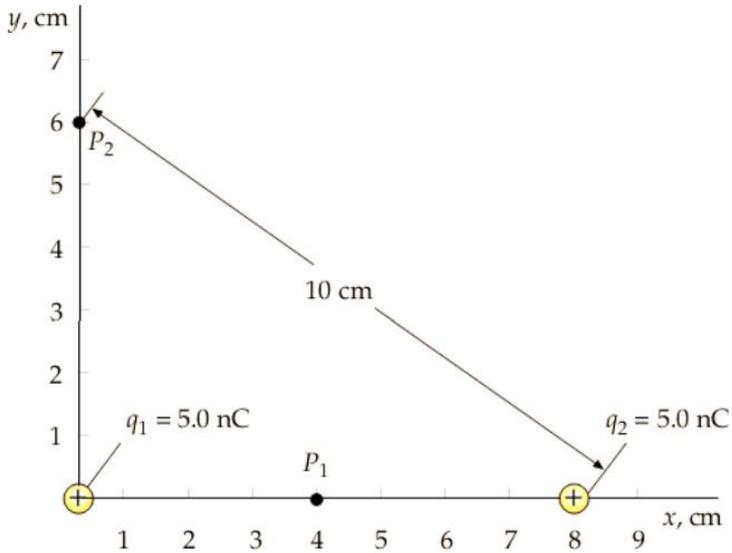
Sebuah cincin dengan radius R dan memiliki kerapatan homogen λ . Berapakan potensial listrik di titik P yang memiliki jarak sebesar z ?

3. Perhatikan pertanyaan !

- Apakah kekuatan medan listrik di antara dua paralel pelat konduktor dapat melebihi kuat medan listrik udara ($3,0 \times 10^6$

- V/m), jika pelat dipisahkan dengan jarak 2,00 mm dan diberikan beda potensial sebesar $5,0 \times 10^3$ V?
- b. Seberapa dekat jarak antara masing-masing pelat agar tegangan pada jawaban a dapat bekerja ?
4. Berapa daya keluaran rata-rata dari defibrilator jantung yang mengalami kehilangan energy 400 J setiap 10 ms ?
 5. Pada atom hidrogen, proton dan elektronnya terpisah sejauh $r = 0,529 \times 10^{-10}$ m
 - a. Tentukan potensial listrik pada jarak dari proton $r = 0,529 \times 10^{-10}$ m
 - b. Tentukan energi potensial elektron dan proton pada pemisahan ini.
 6. Sebuah elektron dipercepat dalam medan listrik seragam yang memiliki kekuatan $2,00 \times 10^6$ V/m.
 - a. Berapa KeV energy yang harus diberikan kepada elektron jika dipercepat mencapai jarak 0,400 m?
 - b. Berapa jarak yang ditempuh elektron jika dipercepat dengan energy sebesar 50,0 GeV?
 7. Jika potensial yang ditimbulkan karena muatan titik sebesar $5,00 \times 10^2$ V pada jarak 15,0 m, tentukan besar muatan listrik tersebut?
 8. Proton dengan massa $1,67 \times 10^{-27}$ kg dan muatan $1,6 \times 10^{-19}$ C diletakkan pada medan listrik yang serba sama $E = 5,0$ N/C dan dilepaskan dalam keadaan bebas. Setelah berjalan 4 cm, berapa kecepatan gerakan proton tersebut?

9. Perhatikan Gambar !



Dua muatan titik sama besar $+5 \text{ nC}$ pada sumbu x. Satu di pusat, dan yang lain pada $x = 8 \text{ cm}$. Tentukan potensial di :

- Titik P_1 pada $x = 4 \text{ cm}$
- Titik P_2 pada $y = 6 \text{ cm}$

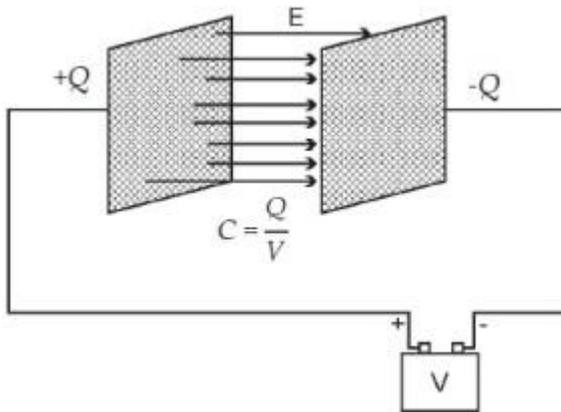
10. Medan listrik menunjuk pada arah x positif dan mempunyai besar konstan $10 \text{ N/C} = 10 \text{ V/m}$. Tentukan potensial sebagai fungsi x, anggap bahwa $V = 0$ pada $x = 0$.

6 Kapasitor dan Dielektrika

6.1 Kapasitansi

Kapasitor adalah suatu alat yang dipergunakan untuk menyimpan muatan listrik. Sebuah kapasitor terdiri dari dua konduktor yang ditempatkan berdekatan tetapi tidak bersentuhan. Perhatikan Gambar 4.1.

Apabila kedua konduktor dihubungkan dengan sumber tegangan V , maka pada konduktor (a) akan terkumpul muatan sebesar $+Q$ dan pada konduktor (b) muatan sebesar $-Q$. Muatan dalam konduktor akan mencapai harga maksimum Q , setelah potensial konduktor (a) mencapai harga V , sama dengan potensial baterai.



Gambar 6.1 Konstruksi kapasitor

Bila luas konduktor dinyatakan dengan A , maka rapat muatan persatuan luas adalah $\sigma = \frac{Q}{A}$ dan medan listrik dalam pelat konduktor, $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$

Beda potensial antara kedua pelat konduktor :

$$V = Vd = \frac{Qd}{\epsilon_0 A}$$

Atau

$$Q = Ed = \frac{\epsilon_0 A}{d} V = CV \quad (1)$$

dan

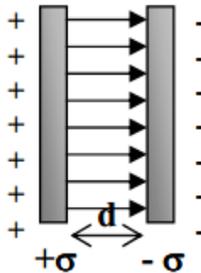
$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2)$$

disini C disebut kapasitansi dan persamaan (2) ini berlaku jika ke dua konduktor adalah dua pelat konduktor yang sejajar. Dari persamaan

(1) jelas bahwa satuan kapasitansi C adalah colomb/volt (CV^{-1}) yang juga disebut Farrad (F).

6.2 Konsep Potensial Listrik dalam Kapasitor

Kapasitor pada prinsipnya komponen elektronika yang terdiri dari dua buah konduktor (dalam hal ini berbentuk pelat) yang berlawanan muatan, masing-masing memiliki luas permukaan A , dan mempunyai muatan persatuan luas σ . konduktor yang dipisahkan oleh sebuah zat yang bersifat isolator atau dielektrik sejauh d .



Gambar 6.2 Kapasitor

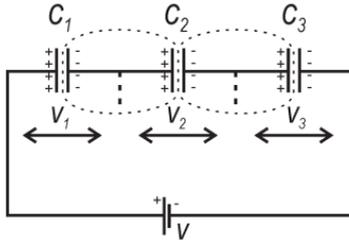
Maka karena berbentuk pelat, sehingga jumlah medan di antara kedua pelat adalah :

6.3 Rangkaian Kapasitor

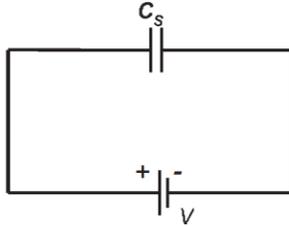
Kapasitor memiliki dua tipe rangkaian, yaitu rangkaian seri dan paralel.

a. Susunan Seri

Susunan seri diperoleh dengan saling menghubungkan elektroda-elektroda (kaki-kaki kapasitor) secara berurutan seperti tampak pada Gambar 6.3 dan Gambar 6.4. Tiga buah kapasitor yang kapasitansya masing-masing C_1 , C_2 , dan C_3 disusun seri dan dihubungkan dengan sumber tegangan yang mempunyai beda potensial V . Ketiga buah kapasitor itu bisa diganti dengan sebuah kapasitor yang dapat kita sebut *kapasitas pengganti hubungan seri* dan diberi lambang C_s . Besarnya kapasitas kapasitor pengganti hubungan seri dapat dicari sebagai berikut.



Gambar 6.3 Rangkaian kapasitor seri



Gambar 6.4 Kapasitas pengganti hubungan seri

Pada kapasitor yang dihubungkan seri, besarnya muatan yang terkandung pada tiap kapasitor adalah sama, karena muatan pada tiap keping kapasitor yang saling berdekatan saling meniadakan. Oleh karena itu, pada kapasitor yang disusun seri berlaku:

$$V_1 = \frac{Q}{C_1}, \quad V_2 = \frac{Q}{C_2}, \quad V_3 = \frac{Q}{C_3}, \quad \text{dan} \quad V_2 = \frac{Q}{C_2},$$

Sedangkan tegangan sumber V sama dengan jumlah tegangan pada masing-masing kapasitor. Apabila masing-masing beda potensial kapasitor itu berturut-turut V_1 , V_2 , dan V_3 maka,

$$V = V_1 + V_2 + V_3$$

Dan

$$\frac{Q}{C_s} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

Maka berlaku hubungan :

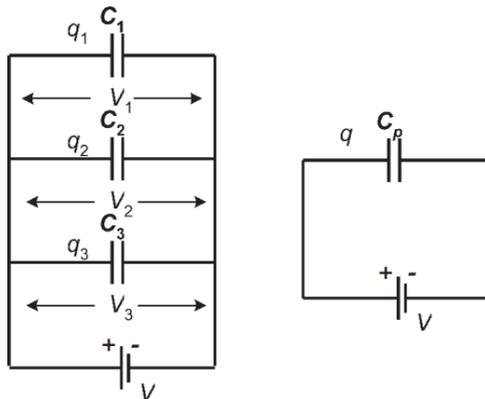
$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \dots \dots \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

(3)

Persamaan (3) menyatakan hubungan nilai kapasitas kapasitor pengganti susunan seri terhadap kapasitas kapasitor penyusunnya. Berdasarkan persamaan ini terlihat bahwa nilai kapasitas kapasitor pengganti hubungan seri selalu lebih kecil dari kapasitas kapasitor penyusunnya.

b. Susunan Paralel

Beberapa kapasitor disusun paralel apabila keping-keping kapasitor yang bermuatan sejenis digabungkan menjadi satu, yaitu kutub positif dijadikan satu dihubungkan dengan kutub positif sumber tegangan dan kutub negatif dijadikan satu dihubungkan dengan kutub negatif sumber tegangan seperti tampak pada Gambar 6.5. Tiga buah kapasitor yang kapasitasnya masing-masing C_1 , C_2 , dan C_3 disusun paralel dan dihubungkan dengan sumber tegangan yang mempunyai beda potensial V . Ketiga buah kapasitor itu dapat diganti dengan sebuah kapasitor yang dapat kita sebut *kapasitor pengganti hubungan paralel* dan diberi lambang C_p . Besarnya kapasitas kapasitor pengganti hubungan paralel dapat dicari sebagai berikut.



Gambar 6.5 Kapasitor disusun paralel

Pada masing-masing kapasitor yang dihubungkan paralel memiliki beda potensial yang sama karena pada masing-masing kapasitor terhubung langsung dengan sumber tegangan,

akan tetapi muatan pada masing-masing kapasitor berbeda. Besarnya muatan total susunan kapasitor tersebut merupakan jumlah masing-masing muatan dalam kapasitor penyusunnya. Misalkan muatan listrik pada masing-masing kapasitor itu Q_1 , Q_2 , dan Q_3 serta beda potensial pada masing-masing kapasitor itu V_1 , V_2 dan V_3 maka berlaku :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \text{ dan } V_1 = V_2 = V_3 = V$$

Besarnya muatan masing-masing kapasitor berturut turut

$$Q_1 = C_1V, Q_2 = C_2V, Q_3 = C_3V \text{ dan } Q = C_pV$$

$$C_pV = C_1V + C_2V + C_3V$$

$$C_pV = (C_1 + C_2 + C_3) V$$

Maka berlaku hubungan :

$$C_p = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i \quad (4)$$

Persamaan (4) menyatakan hubungan nilai kapasitas kapasitor pengganti susunan paralel terhadap kapasitas kapasitor penyusunnya. Berdasarkan persamaan ini terlihat bahwa nilai kapasitas kapasitor pengganti hubungan paralel selalu lebih besar dari kapasitas kapasitor penyusunnya.

6.4 Energi Dalam Medan Listrik

Kerja yang diperlukan untuk memindahkan muatan Q dari pelat negatif ke pelat positif adalah:

$$dW = V_{(Q)}dQ = \frac{Q}{C} d'Q$$

Untuk mengisi kapasitor sampai penuh dari not hingga Q di perlukan kerja :

$$W = \int dW = \int_0^Q \frac{Q}{C}dQ = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

Energi tersimpan dalam kapasitor sama dengan kerja yang di perlukan untuk membentuk medan listrik di dalamnya. Jadi energi yang tersimpan dalam kapasitor bermuatan Q adalah :

$$U = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (5)$$

Karena $Q = C V$ persamaan (4-5) dapat di tulis :

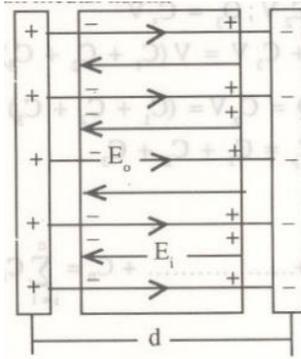
$$U = \frac{1}{2} C V^2 \quad (6)$$

6.5 Dielektrika

Bahan isolator juga disebut dielektrika, terutama bila kita membicarakannya dari segi muatan induksi yang ditimbulkan di dalam medan listrik. Misalkan ruang antara dua pelat logam diisi dengan bahan dielektrika, kemudian kedua pelat kita muati, dengan menghubungkan ke sumber baterai. Sebelum ada dielektrika, kuat medan listriknya:

$$\vec{E}_i = -\hat{i} \frac{\sigma_i}{\epsilon_0}$$

disini σ adalah rapat muatan pada pelat logam. Bila suatu dielektrika di pasang di dalam ruang antara kedua pelat, timbul muatan induksi pada permukaan pelat (Gambar 6.6), dan rapat muatan listrik induksinya adalah σ_1 .



Gambar 6.6 Dua plat logam yang disisipi bahan dielektrika
Kuat medan listrik induksinya :

$$\bar{E}_i = -\hat{i} \frac{\sigma_i}{\epsilon_0}$$

Kuat medan listrik dalam dielektrika adalah super posisi dari kedua medan listrik \bar{E}_0 dan \bar{E}_i dan dinyatakan dengan

$$\bar{E} = \bar{E}_0 + \bar{E}_i = -\hat{i} \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0} - \frac{\sigma_i}{\epsilon_0} \right) \quad (7)$$

Rapat muatan induksi bergantung pada kuat medan listrik dalam dielektrika yaitu \bar{E}_i maka

$$\sigma_i = \chi_e E \quad (8)$$

Maka persamaan (7) menjadi

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} - \frac{\chi_e}{\epsilon_0} E$$

atau

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \left(1 + \frac{\chi_e}{\epsilon_0} \right)} = \frac{\sigma_e}{K \epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (9)$$

disini

$$K = 1 + \frac{\chi_e}{\epsilon_0} \quad \text{disebut konstanta dielektrika.}$$

$$E = K E_0 \quad \text{di sebut permitivitas } \textit{bahan dielektrika}$$

$$\chi_e \quad \text{disebut } \textit{Susceptibilitas listrik.}$$

Dielektrika dalam medan listrik membentuk dipole listrik

$$p = q_i d$$

Vektor polarisasi \bar{p} di didefinisikan sebagai

$$\bar{P} = \chi_e \bar{E} \quad (10)$$

Vektor perpindahan listrik \bar{D} adalah:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon \vec{E} \quad (11)$$

Hukum Gauss untuk dielektrika di nyatakan

$$\int \vec{D} \cdot d\vec{A} = q \quad (12)$$

disini q adalah rnuatan bebas pada pelat yang terkandung dalam permukaan Gauss S.

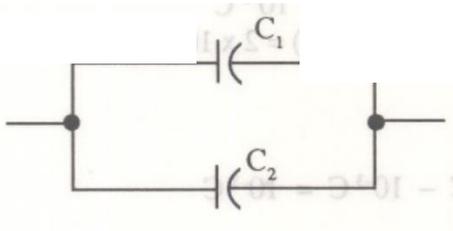
Contoh Soal 6.1

Sebuah kapasitor, $20 \mu\text{F}$ diisi sampai beda potensialnya mencapai 1000 V . Kemudian, kapasitor dihubungkan dengan sebuah kapasitor lain yang belum di isi, yang memiliki kapasitansi $5 \mu\text{F}$.

Hitunglah :

- Muatan kapasitor pertama
- Beda potensial pada masing- masing kapasitor, setelah dihubungkan.
- Energi akhir sistem
- Berkurangnya energi, jika kapasitor dihubungkan

Penyelesaian



- a. Diketahui

$$C_1 = 20 \times 10^{-6} \text{ F}$$

$$V_1 = 1000 \text{ V}$$

Ditanya : Muatan pada kapasitor pertama

Jawab :

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_1 V_1 \\ &= (20 \times 10^{-6} \text{ F})(1000 \text{ V}) \\ &= 2 \times 10^{-2} \text{ C} \end{aligned}$$

- b. Muatan W setelah dihubungkan

$$Q = Q_1 = 2 \times 10^{-2} C$$

Kapasitansi sistem

$$\begin{aligned} C &= C_1 + C_2 \\ &= 20 \mu F + 5 \mu F \\ &= 25 \mu F \end{aligned}$$

Potensial sistem

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{2 \times 10^{-2} C}{25 \times 10^{-6} F} = 800 V$$

- c. Energi akhir sistem

$$\chi = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} (2 \times 10^{-2} C)(800 V) = 8 J$$

- d. Energi sebelum dihubungkan

$$\chi_1 = \frac{1}{2} Q_1 V_1 = \frac{1}{2} (2 \times 10^{-2} C)(1000 V) = 10 J$$

Energi yang hilang setelah kedua kapasitor dihubungkan

$$\Delta x = x_1 - x = 10 J - 8 J = 2 J$$

Contoh Soal 6.2

Tentukan kapasitas kapasitor pelat sejajar dengan luas pelat masing-masing 20 cm x 30 cm, terpisah oleh udara pada jarak 1 mm dan tentukan pula besar muatan pada masing-masing pelat, jika kapasitas itu dihubungkan pada baterai 12 volt.

Penyelesaian

- Kapasitas kapasitor

$$A = 20 \times 30 \times 10^{-4} m^2 = 6,0 \times 10^{-3} m^2$$

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = (8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2) \frac{(6,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2)}{(1,0 \times 10^{-3} \text{ m})} = 53 \text{ pF}$$

- Muatan masing-masing plat

$$Q = CV = (53 \times 10^{-12} \text{ F})(12 \text{ V}) = 6,4 \times 10^{-10} \text{ C}$$

Contoh Soal 6.3

Suatu kondensator udara, terdiri-dari dua buah pelat yang berdekatan dengan $C = 1000 \mu\text{F}$. Muatan pada pelat adalah $1 \mu\text{C}$,

- Berapakah beda potensial antara dua pelat?
- Jika muatan konstan, berapa beda potensial jika jarak dua pelat di dua kalikan.
- Berapa besar usaha yang diperlukan untuk mendua kalikan jarak pelat itu?

Penyelesaian

- Beda Potensial

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{(1,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(1000 \times 10^{-12} \text{ F})} = 10^3 \text{ V}$$

- Jarak dua pelat d. Kapasitasnya

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad \text{dan} \quad V_1 = \frac{Q}{C_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 \frac{A}{d}} = 10^3 \text{ V}$$

- Energi pelat pada jarak d

$$X = \frac{1}{2} C_0 V^2 = \frac{1}{2} (10^{-9} \text{ F})(10^6 \text{ V}) = 0,5 \times 10^{-3} \text{ J}$$

Energi pelat pada jarak $2d$

$$X = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} (500 \times 10^{-12} \text{ F})(2000 \text{ V})^2 = 10^{-3} \text{ J}$$

Pertambahan energi = kerja yang dilakukan untuk menduakalikan

$$\Delta X = 10^{-3} \text{ J} - (0,5 \times 10^{-3} \text{ J}) = 0,5 \times 10^{-3} \text{ J}$$

Evaluasi

1. Kapasitor pelat sejajar mempunyai kapasitansi $2 \mu\text{F}$ di udara, dan $4,6 \mu\text{F}$ dalam bensena. Berapakah tetapan dielektrik bensena?
2. Tiga buah kapasitor dengan besar kapasitansi masing-masing $1 \mu\text{F}$; $2 \mu\text{F}$ dan $3 \mu\text{F}$ dirangkai seri. Tentukan kapasitansi ekivalennya!
3. Dua kapasitor $3 \mu\text{F}$ dan $4 \mu\text{F}$ secara terpisah diberi muatan dengan rncnghubungannya pada sumber tegangan 6V . Sesudah dilepas dari baterai, keping negatif yang satu dihubungkan dengan keping positif kapasitor yang lain. Berapakah muatan akhir pada masing-masing kapasitor?
4. Sebuah kapasitor mempunyai muatan $5 \times 10^{-4} \text{ C}$, beda tegangan yang diberikan 300 V . Berapakah kapasitansinya!
5. Kapasitor keping terdiri-dari dua buah keping, masing-masing luasnya 200 cm^2 , berjarak $0,4 \text{ cm}$ dalam udara.
 - a. Berapakah kapasitasnya?
 - b. Jika kapasitor dihubungkan dengan sumber 500 V , berapa muatan yang terhimpun di dalamnya, berapa pula energi kapasitomya, dan berapa E antara ke dua kepingnya?