

MODUL I

FISIKA LISTRIK MAGNET

MUATAN LISTRIK

Tujuan intruksional umum

Agar mahasiswa dapat memahami materi Fisika Listrik tentang muatan listrik

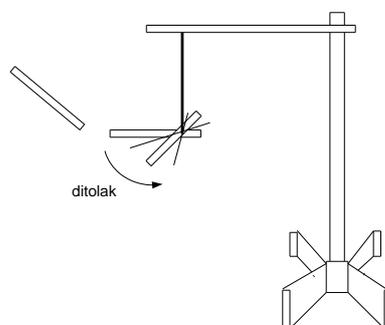
Tinjauan Instruksional khusus

- Dapat memahami bentuk, sifat dan jenis muatan listrik
- Dapat memahami konsep dasar kelistrikan dan kemagnetan

Buku Rujukan:

- | | |
|----------------------|--------------------|
| ▪ Giancoli | Physics |
| ▪ Kane & Sterheim | Physics 3 Edition |
| ▪ Sears & Zemansky | University Physics |
| ▪ Frederick J Bueche | Seri Buku Schaum |
| ▪ Sutrisno | Seri Fisika Dasar |
| ▪ Johannes Surya | Olimpiade Fisika |

Dari pengamatan jika sisir plastik digosokkan ke rambut atau mistar dari mika digosokkan ke bulu binatang, jika didekatkan pada potongan kertas maka potongan kertas akan tertarik. Jika plastik yang digosok terdapat dua buah dan ditempatkan sebagai berikut :



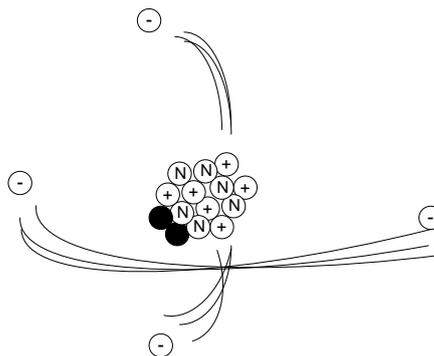
Gambar 1.1

Tetapi jika yang diletakkan pada plastik tersebut adalah mika yang digosok sutra maka akan terjadi tarik menarik.

1.1. Jenis Muatan

Dari pengamatan tersebut terdapat dua jenis muatan dan muatan yang sejenis selalu tolak menolak dan muatan tak sejenis selalu tarik menarik. Benyamin Franklin (1706-1790) menyebut dua jenis muatan tersebut muatan positif dan negatif, semua benda terbuat dari atom. Atom terdiri dari elektron bermuatan negatif yang mengitari inti atom yang terdiri dari proton bermuatan positif dan neutron yang tidak bermuatan.

Elektron dan proton bermuatan sama besar tetapi beda jenis. Atom normal memiliki cukup elektron untuk mengimbangi proton di inti sehingga atom menjadi netral



Gambar 1.2

Jika salah satu elektron dipindahkan dari sebuah atom, atom akan menjadi ion bermuatan positif. Elektron adalah materi penyusun muatan yang dapat dipindahkan dari suatu benda ke benda lain. Elektron juga dapat berpindah dari benda yang sama, misalnya dalam kawat penghantar.

Contoh elektron pindah dari suatu benda ke benda lain :

- ketika kita menggosok tongkat plastik dengan bulu, beberapa elektron bulu tersapu bersih, dan pindah ke tongkat plastik sehingga tongkat mendapat muatan negatif dan bulu menjadi muatan positif.

- Demikian juga dengan sutra yang digunakan untuk menyapu mistar mika, sutra menyapu bersih elektron mistar dan mistar menjadi bermuatan positif.

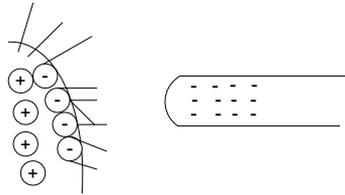
1.2. Sifat Bahan

Karena elektron dapat berpindah dari satu benda ke benda lain maka mempengaruhi sifat bahan sehingga terdapat beberapa jenis bahan, antara lain :

- **Konduktor**
Adalah bahan yang mengandung elektron-elektron bebas sehingga jika dipengaruhi medan listrik akan terjadi gaya tarik
 $F = qE$
 $q = \text{muatan elektron}$
 $= 1,6 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$
Sehingga terjadi aliran elektron atau terjadi arus listrik.
- **Isolator**
Adalah bahan yang elektron-elektron terikat oleh inti atom sehingga jika dipengaruhi oleh medan listrik hanya terjadi polarisasi dan tidak terjadi aliran muatan.
- **Semikonduktor**
Adalah bahan yang pada suhu kamar dan jika dipengaruhi oleh medan lemah tidak terjadi aliran muatan tetapi pada suhu tertentu atau dipengaruhi medan kuat bisa terjadi aliran muatan.

1.3. Muatan bersifat Kekal

Ketika mistar bermuatan netral digosokkan pada bulu binatang, muatan positif bulu akan berpasangan dengan muatan negatif mistar.

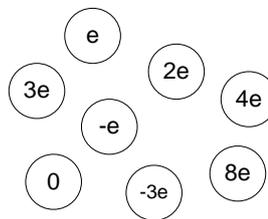


Gambar 1.3

Jumlah muatan, penjumlahan muatan negatif dan positif dalam sistem tertutup tidak bisa berubah.

1.4. Muatan Terkuantisasi

Muatan listrik dari suatu partikel atau benda selalu kelipatan muatan terkecil (muatan “fundamental”) e . secara umum muatan partikel q ditulis $q = Ne$ dengan N merupakan bilangan bulat (positif dan negatif). Misalkan elektron bermuatan $-e$ proton bermuatan $+e$ dan neutron tidak bermuatan.



Gambar 1.4

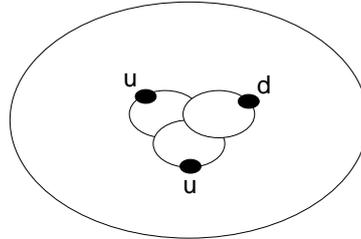
Menurut teori modern ada partikel yang muatannya bukan kelipatan bilangan bulat dari e partikel ini adalah kuark (quark) yang menyusun proton dan neutron. Menurut teori ini ada dua macam kuark yang menyusun proton dan neutron yaitu :

Kuark u (“up quark”) bermuatan $+ 2/3 e$

Kuark d (“down quark”) bermuatan $-1/3 e$

Proton bermuatan $+e$ komposisinya adalah terdiri dari 2 kuark u dan 1 kuark d, sehingga muatan totalnya adalah :

$$q_p = 1\left(\frac{2}{3}e\right) + 1\left(-\frac{1}{3}e\right) = e$$

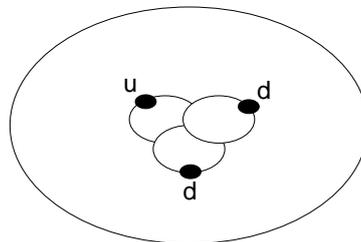


Proton $q_p = e$

Gambar 1.5

Sedang neutron bermuatan netral terdiri dari 1 kuark u dan 2 kuark d, sehingga muatan totalnya adalah :

$$q_n = 1\left(\frac{2}{3}e\right) + 2\left(-\frac{1}{3}e\right) = 0$$



Neutron $q_n = 0$

Gambar 1.6

Sampai saat ini muatan kuark tunggal belum dapat dideteksi secara langsung melalui eksperimen. Kuark selalu berpasangan atau bertiga sebabnya sampai sekarang e masih dianggap muatan terkecil yang pernah dideteksi. Satuan muatan listrik dalam SI adalah Coulomb. Coulomb merupakan satuan turunan dari besaran pokok arus (=Amper).

$$1 \text{ coulomb} = 1 \text{ Amper} \cdot \text{detik}$$

Dalam satuan Coulomb besar muatan terkecil $|e|$ (nilai muatan proton atau elektron) adalah :

$$|e| = 1,60218 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

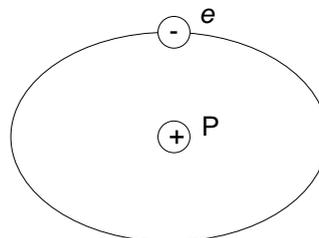
Tabel 1 menunjukkan muatan dan massa elektron proton dan neutron.

Tabel 1

Partikel	Muatan (C)	Massa (Kg)
Elektron (e)	$-1,6022 \times 10^{-19}$	$9,1094 \times 10^{-31}$
Proton (p)	$+1,6022 \times 10^{-19}$	$1,67262 \times 10^{-27}$
Neutron (n)	0	$1,67493 \times 10^{-27}$

1.5. Muatan Atom

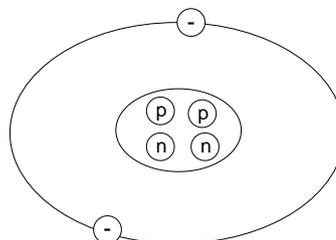
Suatu atom biasanya terdiri dari proton, neutron dan elektron. Jumlah proton dan elektron dalam satu atom sama banyak. Itulah sebabnya atom bersifat netral misalnya atom hidrogen terdiri dari 1 proton dan 1 elektron.



Atom hidrogen

Gambar 1.7

Dan atom helium terdiri dari 2 proton, 2 elektron dan 2 neutron



Atom Helium

Gambar 1.8

Atom dapat menjadi bermuatan listrik positif dan negatif dengan melepaskan atau menerima elektron. Atom bermuatan listrik ini dinamakan *ion*.

1.6. Muatan Benda

Benda terdiri dari banyak sekali molekul-molekul misalnya 1 gram air terdiri dari $3,3 \times 10^{22}$ molekul-molekul ini tersusun dari atom-atom yang bersifat netral artinya jumlah muatan positif dan negatif dalam suatu benda sama banyak.

1.7. Konsep Dasar Kelistrikan dan Kemagnetan

Pada awalnya kelistrikan dan kemagnetan adalah sesuatu yang terpisah sebelum ditemukan beberapa percobaan yang menunjukkan adanya saling pengaruh mempengaruhi. Beberapa percobaan yang pernah dilakukan sehingga menjadi fondasi kelistrikan dan kemagnetan antara lain :

1. Charles Augustin Coulomb (1736-1806) menemukan gaya interaksi antara satu muatan dengan muatan lain yang besarnya berbanding lurus dengan perkalian muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak. "dapat dikatakan bahwa disekitar muatan listrik terdapat medan listrik". Dengan perkataan lain jika kita menyimpan muatan disekitar muatan lain maka akan mendapat gaya tarik atau gaya tolak.
2. Hans Oersted pada tahun 1819 Fisikawan Denmark menemukan hubungan antara kelistrikan dan kemagnetan. Secara tidak sengaja ia menemukan bahwa muatan yang bergerak (arus listrik) dapat menimbulkan medan magnet. Rumus matematika untuk medan magnet akibat kawat berarus listrik ditemukan oleh Andre Ampere beberapa tahun setelah penemuan Oersted.
3. Penemuan Oersted ini membangkitkan gairah para fisikawan untuk mempelajari hubungan antara sifat kemagnetan dan kelistrikan. Sepuluh tahun setelah penemuan Oersted, Michael Faraday dan Joseph Henry berhasil menunjukkan bahwa medan listrik dapat diperoleh dari medan magnet. Sejak saat itu orang mulai percaya bahwa listrik dan magnet itu sebenarnya satu fenomena.

4. Dari penemuan-penemuan yang ada, Maxwell beranggapan jika medan magnet dapat menimbulkan medan listrik maka sebaliknya harus terjadi. Maxwell merumuskan teori-teori yang sangat terkenal yang disusun dari teori Coulomb dan Gauss Ampere; Faraday dan Hypotesa Maxwell sebagai berikut :

- $\oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q$ enclose
- $\oiint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$
- $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \oiint \vec{B} \cdot d\vec{s}$
- $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \pm$ enclose

Hubungan kelistrikan yang disarikan pada Hk. Maxwell ini merupakan suatu revolusi besar dalam bidang teknologi komunikasi, teknologi satelit, teknologi komputer dan teknologi lainnya yang tidak akan pernah lahir tanpa orang mengetahui hubungan antara sifat kelistrikan dan kemagnetan.

MODUL II

FISIKA LISTRIK MAGNET

GAYA INTERAKSI COULOMB

Tujuan intruksional umum

Agar mahasiswa dapat memahami materi Fisika Listrik tentang terjadinya gaya interaksi coulomb antar muatan listrik.

Tinjauan Instruksional khusus

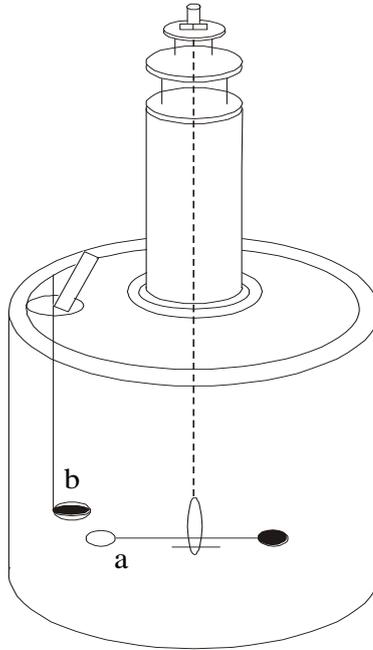
- Dapat memahami sifat interaksi listrik antar muatan
- Dapat menentukan gaya interaksi antar muatan pada bidang (dua dimensi)
- Dapat menentukan gaya interaksi antar muatan pada ruang tiga dimensi kartesia
- Dapat menentukan gaya interaksi antar muatan-muatan titik pada ruang tiga dimensi

Buku Rujukan:

- | | |
|----------------------|--------------------|
| ▪ Giancoli | Physics |
| ▪ kane & Sterheim | Physics 3 Edition |
| ▪ Sears & Zemanky | University Phisics |
| ▪ Frederick J Bueche | Seri Buku Schaum |
| ▪ Sutrisno | Seri Fisika Dasar |
| ▪ Johanes Surya | Olimpiade Fisika |

2.1 Hukum Coulomb

Charles Augustin Coulomb (1736-1806) melakukan pengujian terhadap gaya interaksi antara dua muatan listrik yang ditempatkan pada neraca coulomb sbb:



Gambar 2.1 Neraca Coulomb

Jika bola a dan b bermuatan, batang yang tergantung piber akan berputar, untuk menghitung sudut putarnya coulomb memutar “suspension head (penahan)” ke arah berlawanan sehingga batang kembali ke kedudukan semula. Besarnya simpangan sebanding dengan gaya yang mengakibatkan bola pada batang berputar.

$$T = F \cdot r$$

$$T = K\theta$$

T = Momen Gaya (Nm)

F = Gaya (N)

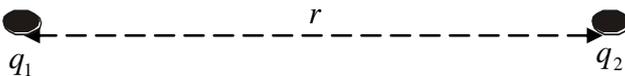
r = Jari-jari

K = Konstanta gaya putar ($\frac{Nm}{r\text{nd}}$)

θ = Sudut (rnd)

Skala yang terbaca pada penahan merupakan besar sudut putar itu.

Menurut coulomb gaya yang ditimbulkan oleh muatan-muatan ini sebanding dengan besar masing-masing muatan dan berbanding terbalik dengan jarak kedua muatan.

$$F \approx \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$


F = Gaya interaksi tarik-menarik atau tolak menolak

q1, q2 = Besarnya muatan

Dalam satuan internasional (SI Unit) agar gaya dalam satuan Newton maka ruas kanan dikalikan konstanta

$$F \approx k \frac{q_1 q_2}{r} \text{ (Hk. Coulomb)}$$

Untuk Vacuum / udara dari hasil eksperimen nilai K adalah

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

ϵ_0 = Permittivitas listrik di udara atau hampa

$$= \frac{1}{4\pi k} = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ C}^2/\text{Nm}^2 \approx 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$$

Hukum ini berlaku untuk benda-benda bermuatan yang berukuran kecil (muatan titik) yang terpisahkan oleh jarak yang relatif jauh lebih besar dibanding ukuran benda. Untuk ruang atau medium yang bukan udara atau vacuum konstanta coulomb menjadi

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

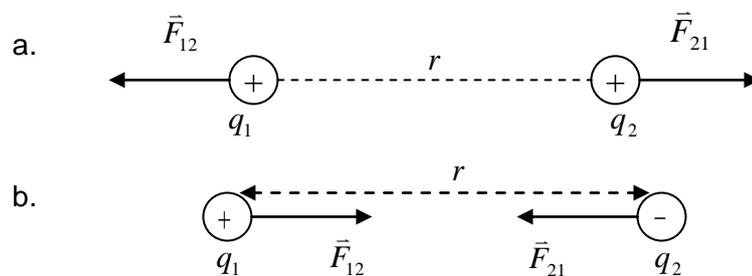
ϵ_r = permitivitas relative medium

Gaya interaksi yang terjadi untuk medium selain udara atau vacuum

$$F = k^1 \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F = \frac{k q_1 q_2}{\epsilon_r r^2} = \frac{F_4}{\epsilon_r}$$

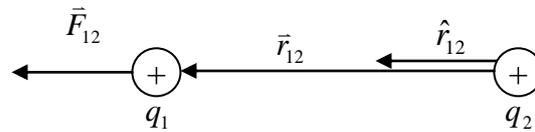
2.2 Gaya Coulomb Sama dengan Gaya Yang Lain merupakan besaran vektor yang mempunyai harga dan arah



Gambar 2.2

- Gaya interaksi antara muatan sejenis
- Gaya interaksi antara muatan yang tak sejenis

Dilihat dari q_1 untuk gambar a



\vec{F}_{12} Gaya di titik 1 akibat muatan 2

\vec{r}_{12} adalah vektor satuan jarak dari 2 ke 1

Vektor satuan untuk vektor di atas adalah $\hat{r}_{12} = \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}$

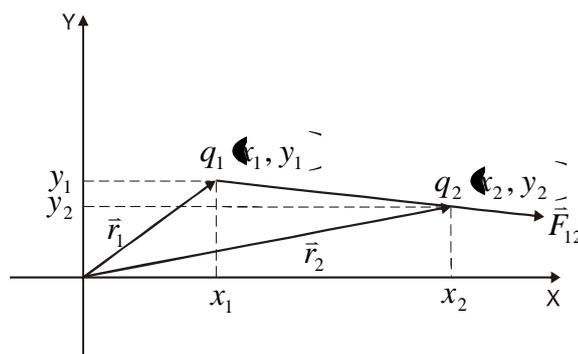
$$\boxed{\vec{F}_{12}} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2}$$

$$\boxed{\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{12}}$$

atau
$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}$$

$$\boxed{\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} \vec{r}_{12}}$$

2. 3 Gaya coulomb untuk muatan dalam satu bidang



Gambar 2.3 Posisi dua muatan dalam satu bidang

Seperti terlihat pada gambar, muatan q_1 pada posisi $(x_1; y_1)$ dan q_2 pada posisi dilihat dari pusat koordinat.

$$\vec{r}_1 = \hat{a}_x x_1 + \hat{a}_y y_1$$

$$\vec{r}_2 = \hat{a}_x x_2 + \hat{a}_y y_2$$

dilihat dari titik q_2

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_{21} = \vec{r}_2$$

$$\vec{r}_{21} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

Nilai jarak dari q_1 ke r_2

$$|\vec{r}_{21}| = |\vec{r}_2 - \vec{r}_1| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

$$\text{atau } |r_2 - r_1| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

dan

$$\vec{r}_{21} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|r_2 - r_1|}$$

$$\vec{r}_{21} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1 = \frac{\hat{a}_x (x_2 - x_1) + \hat{a}_y (y_2 - y_1)}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}$$

Contoh :

Dua muatan listrik masing-masing sebagai berikut :

$$q_1 = \frac{100}{9} \mu\text{C} \text{ pada posisi } (2;3)\text{m}$$

$$q_2 = 50\text{mC} \text{ pada posisi } (8;11)\text{m}$$

Tentukan \vec{F}_{12} dan \vec{F}_{21} juga $|F_{12}|$ dan $|F_{21}|$

Jawab :

$$\vec{r}_1 = 2\hat{a}_x + 3\hat{a}_y$$

$$\vec{r}_2 = 8\hat{a}_x + 11\hat{a}_y$$

Untuk mencari \vec{F}_{12} maka gunakan persamaan

$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{|r_1 - r_2|^2} \hat{r}_{12}$$

$$|r_1 - r_2|^2 = \left[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \right] = \left[(-8)^2 + (-11)^2 \right]$$

$$= 64 + 121 = 185 = 10^2$$

$$\hat{r}_{12} = \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_2}{|r_1 - r_2|} = \frac{\hat{a}_x (x_1 - x_2) + \hat{a}_y (y_1 - y_2)}{10}$$

$$\hat{r}_{12} = \frac{\hat{a}_x (-8) + \hat{a}_y (-11)}{10} = -\hat{a}_x 0,8 - \hat{a}_y 1,1$$

$$\vec{F}_{12} = 9 \times 10^9 \frac{100 \times 10^{-6} \cdot 50 \times 10^{-3} (-\hat{a}_x 0,8 - \hat{a}_y 1,1)}{10^2}$$

$$\vec{F}_{12} = -\hat{a}_x 396 - \hat{a}_y 495$$

$$|F_{12}| = \sqrt{396^2 + 495^2} = 630 \text{ N}$$

$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{|r_2 - r_1|^2} \hat{r}_{21}$$

$$\hat{r}_{21} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|r_2 - r_1|} = \frac{\hat{a}_x (x_2 - x_1) + \hat{a}_y (y_2 - y_1)}{\left[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 \right]^{1/2}}$$

$$\hat{r}_{21} = \frac{\hat{a}_x (8) + \hat{a}_y (11)}{10} = 0,8\hat{a}_x + 1,1\hat{a}_y$$

$$\hat{r}_{21} = 0,8\hat{a}_x + 1,1\hat{a}_y$$

$$|r_2 - r_1| = |r_1 - r_2| = 10 \text{ kenapa ?}$$

sehingga

$$\vec{F}_{21} = 9 \times 10^9 \frac{100 \times 10^{-6} \cdot 50 \times 10^{-3}}{10^2} (0,6\hat{a}_x + 0,8\hat{a}_y)$$

$$\vec{F}_{21} = 30\hat{a}_x + 40\hat{a}_y$$

$$|F_{21}| = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50N$$

Perhatikan contoh di atas apa yang anda simpulkan dari interaksi dua muatan di atas.

2.4 Gaya interaksi antara dua muatan dilam ruang tiga dimensi Kartesian

Dua muatan titik q_1 pada posisi (x_1, y_1, z_1) ,

Dan muatan q_2 pada posisi (x_2, y_2, z_2) ,

Ingin dicari gaya interaksi di salah satu titik misal q_2

Secara sederhana dapat digambarkan sebagai berikut :

Seperti pada bidang dua dimensi pada ruang, pada ruangpun analog dilikat dari q_2 :

$$\vec{r}_1 + \vec{r}_{21} = \vec{r}_2$$

$$\vec{r}_{21} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

Untuk mendapat harga jarak kedua titik berlaku pythagoras :

$$|r_{21}| = |r_2 - r_1| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

$$\hat{r}_{21} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|r_2 - r_1|} = \frac{ax \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}}$$

Persamaan yang berlaku :

Atau

Contoh :

Dua buah muatan listrik masing-masing sbb:

$$q_1 = \frac{100}{9} \mu\text{C} \text{ pada posisi } (1;2;3)\text{m}$$

$$q_2 = 10\sqrt{2} \text{ mc pada posisi } (4;6;8)\text{m}$$

Tentukan gaya dititik q_2 ?

Penyelesaian :

Evaluasi :

Untuk mengetahui apakah saudara sudah memahami modul ini atau belum cobalah is pertanyaan-pertanyaan di bawah ini!

1. Apa yang dilakukan Coulumb untuk menentukan besar gaya interaksi antara dua muatan.
2. a. Tentukan jarak antara dua muatan q_1 dititik $(3;2;5)\text{m}$ dan q_2 di titik $(9;8;5)\text{m}$
b . Tentukan unit vektornya.
3. Jika q_1 sebesar $100\mu\text{C}/9$ dan $q_2=10\text{mc}$ pada medium pada medium yang permitivitas relatifnya 5 posisi seperti soal no.2 tentukan gaya di q_1 dan q_2 .

MODUL III
FISIKA LISTRIK MAGNET
GAYA INTERAKSI AKIBAT MUATAN TITIK BANYAK

Tujuan instruksional umum :

Setelah mempelajari pokok bahasan ini mahasiswa diharapkan dapat menganalisis gaya interaksi muatan – muatan titik lebih dari dua.

Tujuan instruksional khusus :

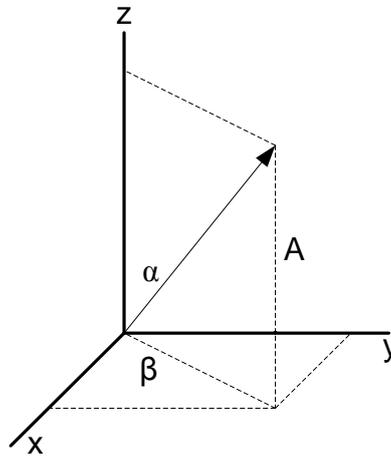
- Menjelaskan penjumlahan vektor pada ruang tiga dimensi.
- Menjelaskan resultan gaya intraksi disuatu titik.

Buku rujukan :

- | | |
|----------------------|--------------------|
| ▪ Giancoli | Physics |
| ▪ kane & Sterheim | Physics 3 Edition |
| ▪ Sears & Zemanky | University Phisics |
| ▪ Frederick J Bueche | Seri Buku Schaum |
| ▪ Sutrisno | Seri Fisika Dasar |
| ▪ Johanes Surya | Olimpiade Fisika |

3.1. Penjumlahan tiga dimensi pada kordinat kartesian

Sebuah vektor pada tiga dimensi misalnya



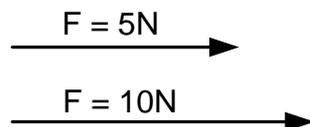
Dengan menggunakan ilmu ukur sederhana dapat diuraikan menjadi komponen – komponen vektor pada masing – masing sumbu :

$$A_x = A \sin \alpha \cos \beta$$

$$A_y = A \sin \alpha \sin \beta$$

$$A_z = A \cos \alpha$$

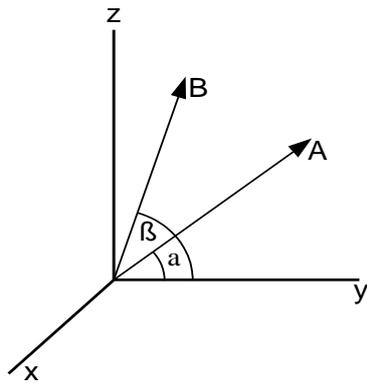
Dua vektor sejajar bisa dijumlahkan seperti bilangan biasa



$$R = F_1 + F_2 = 5 + 10 = 15N$$

Tetapi ketika vektor mempunyai arah yang berbeda mencari resultan nya harus mengikuti metode analitik antara lain sbb:

$$\vec{A} = a_x \hat{x} + a_y \hat{y}$$



$$\vec{B} = \hat{a}_x Bx + \hat{a}_y By$$

$$\vec{A} = \hat{a}_x A \cos \alpha + \hat{a}_y A \sin \alpha$$

$$\vec{B} = \hat{a}_x B \cos \beta + \hat{a}_y B \sin \beta$$

$$\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$$

$$\vec{R} = (\hat{a}_x A_y + \hat{a}_y A_y) + (\hat{a}_x Bx + \hat{a}_y By)$$

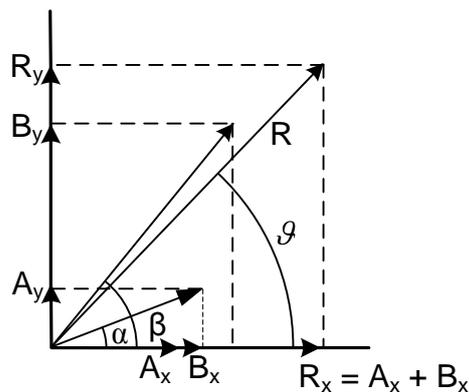
$$= \hat{a}_x (Ax + Bx) + \hat{a}_y (Ay + By)$$

$$= \hat{a}_x (A \cos \alpha + B \cos \beta) + \hat{a}_y (A \sin \alpha + B \sin \beta)$$

Dimana :

$A \cos \alpha + B \cos \beta =$ Resultan Vektor pada Sbx (R_x)

$A \sin \alpha + B \sin \beta =$ resultan vektor pada Sby (R_y)



$$R = \left(R_x^2 + R_y^2 \right)^{1/2}$$

$$Y = \operatorname{inv}tg \frac{R_x}{R_y}$$

Untuk resultan tiga dimensi analog dengan vektor 2 Dimensi :

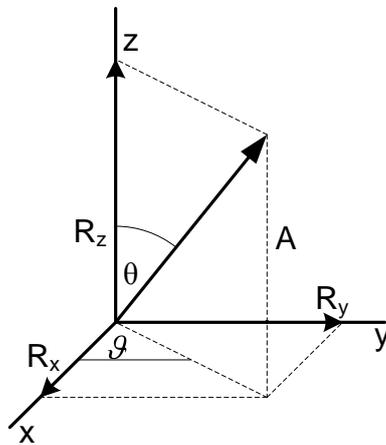
$$A = \hat{a}_x A_x + \hat{a}_y A_y + \hat{a}_z A_z$$

$$B = \hat{a}_x B_x + \hat{a}_y B_y + \hat{a}_z B_z$$

$$R = \vec{A} + \vec{B} = \hat{a}_x (A_x + B_x) + \hat{a}_y (A_y + B_y) + \hat{a}_z (A_z + B_z)$$

$$= \hat{a}_x R_x + \hat{a}_y R_y + \hat{a}_z R_z$$

$$R = (R_x^2 + R_y^2 + R_z^2)^{1/2}$$



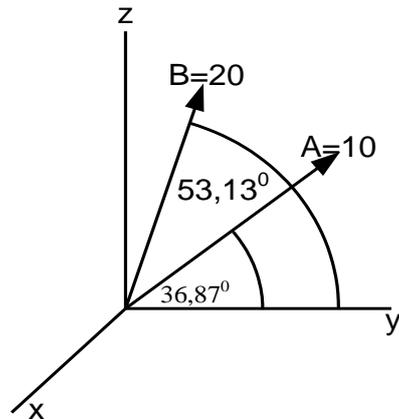
$$\theta = \operatorname{inv} \cos \left[\frac{R_z}{R} \right]$$

$$\varphi = \operatorname{inv} \sin \left[\frac{R_y}{R_x} \right]$$

Tentukan $R = A + B$

Jawab :

$$\begin{aligned} A &= \hat{a}_x A_x + \hat{a}_y A_y \\ &= \hat{a}_x A \cos 36,87^\circ + \hat{a}_y A \sin 36,87^\circ \\ &= \hat{a}_x 10,08 + \hat{a}_y 10,06 \\ &= \hat{a}_x 8 + \hat{a}_y 6 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} B &= \hat{a}_x B_x + \hat{a}_y B_y \\ &= \hat{a}_x B \cos 53,13^\circ + \hat{a}_y B \sin 53,13^\circ \\ &= \hat{a}_x 20,06 + \hat{a}_y 20,08 \\ &= \hat{a}_x 12 + \hat{a}_y 16 \end{aligned}$$

$$R = A + B$$

$$\begin{aligned} R &= (8\hat{a}_x + 6\hat{a}_y) + (12\hat{a}_x + 16\hat{a}_y) \\ &= \hat{a}_x (8 + 12) + \hat{a}_y (6 + 16) \\ &= \hat{a}_x 20 + \hat{a}_y 22 \end{aligned}$$

$$R = \sqrt{20^2 + 22^2} = \sqrt{400 + 484} = \sqrt{884} = 29,73$$

$$\varphi = \text{invtg} \left[\frac{22}{20} \right] = \text{invtg} 1,1 = 47,72^\circ$$

Penyelesaian :

$$Ax = A \sin 45 \cos 53,13^\circ = 10\sqrt{2} \left(\frac{1}{2} \sqrt{2} \right) (0,6) = 6$$

$$Ay = A \sin 45 \sin 53,13^\circ = 10\sqrt{2} \left(\frac{1}{2} \sqrt{2} \right) (0,6) = 8$$

$$Az = A \cos 45 = 10\sqrt{2} \left(\frac{1}{2} \sqrt{2} \right) (0,6) = 10$$

Jika :

$$A = 2\hat{a}_x + 3\hat{a}_y + 4\hat{a}_z$$

$$B = 8\hat{a}_x + 3\hat{a}_y + 4\hat{a}_z$$

Tentukan : $R = A + B$; φ dan θ ?

Jawab :

$$R = (2\hat{a}_x + 3\hat{a}_y + 4\hat{a}_z) + (8\hat{a}_x + 3\hat{a}_y + 4\hat{a}_z)$$

$$= 10\hat{a}_x + 6\hat{a}_y + 8\hat{a}_z$$

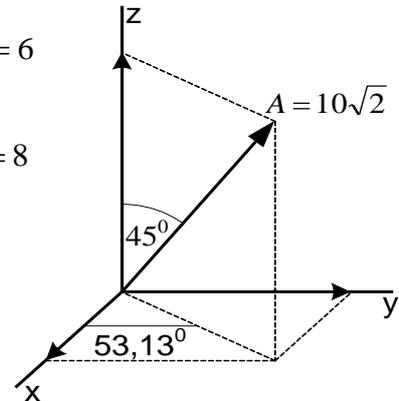
$$R = \sqrt{10^2 + 6^2 + 8^2} = \sqrt{200} = 10\sqrt{2}$$

$$\theta = \operatorname{invcos} \left[\frac{R_z}{R} \right] = \operatorname{invcos} \left[\frac{8}{10\sqrt{2}} \right]$$

$$= \operatorname{invcos} \left[\frac{8}{14,14} \right] = \operatorname{invcos}(0,5657) = 55,5^\circ$$

$$\varphi = \operatorname{invtg} \left[\frac{R_y}{R_x} \right]$$

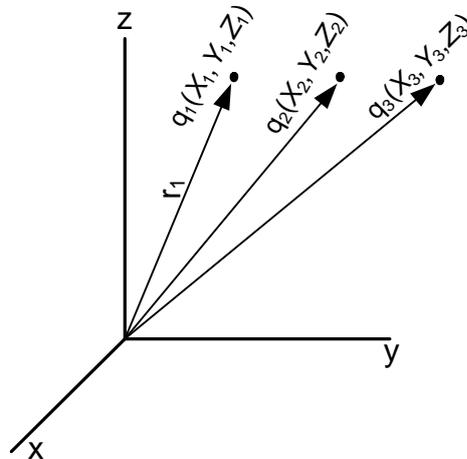
$$= \operatorname{invtg} \left[\frac{6}{10} \right] = \operatorname{invtg}(0,6) = 30,96^\circ$$



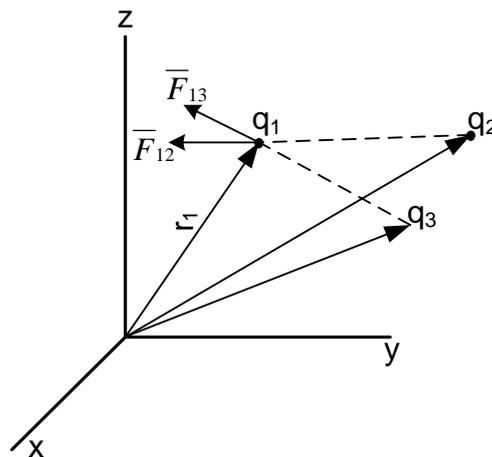
3.2 Gaya interaksi Couloumb akibat muatan banyak

Jika muatan-muatan titik dipisahkan oleh jarak tertentu dimana dimensi muatan (ukuran besarnya muatan) jauh lebih kecil dibanding jarak antara muatan maka gaya interaksi dapat dijumlahkan dengan metode penjumlahan vektor.

Misalnya diketahui muatan sebagai berikut :



Ingin dicari gaya di salah satu muatan misalnya dititik q_1 maka dapat diuraikan sebagai berikut :



$$\begin{aligned} \vec{F}_R \text{ di } q_1 &= \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} \\ &= k \frac{q_1 q_2 (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3} + k \frac{q_1 q_3 (\vec{r}_1 - \vec{r}_3)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_3|^3} \end{aligned}$$

Hasil dari penyelesaian baik \vec{F}_{12} ataupun \vec{F}_{13} adalah merupakan besaran vektor maka harga resultant dari kedua vektor diatas diselesaikan seperti pada persoalan sebelumnya

Metoda ini dapat digunakan untuk menyelesaikan Resultane dari gaya interaksi Coulomb dari muatan –muatan titik yang banyak.

Contoh :

1. Empat buah muatan masing-masing sebagai berikut :

$$q_1 = \frac{100}{9} \mu\text{C pada posisi } (10;10;0) \text{ m}$$

$$q_1 = 30\text{mC pada posisi } (0;0;0) \text{ m}$$

$$q_1 = 40\text{mC pada posisi } (0;10;0) \text{ m}$$

$$q_1 = 50\text{mC pada posisi } (10;10;10) \text{ m}$$

Tentukan resultan gaya interaksi coulomb dari titik q_1 :

Penyelesaian :

$$\vec{r}_1 = 10\hat{a}_x + 10\hat{a}_y$$

$$\vec{r}_2 = 10\hat{a}_x$$

$$\vec{r}_3 = 10\hat{a}_x$$

$$\vec{r}_4 = 10\hat{a}_x + 10\hat{a}_y + 10\hat{a}_z$$

$$(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) = 10\hat{a}_y$$

$$|\vec{r}_1 - \vec{r}_2| = 10\hat{a}_y$$

$$|\vec{r}_1 - \vec{r}_2| = \sqrt{10^2} = 10\text{m}$$

$$(\vec{r}_1 - \vec{r}_3) = 10\hat{a}_x$$

$$|\vec{r}_1 - \vec{r}_3| = \sqrt{10^2} = 10\text{m}$$

$$(\vec{r}_1 - \vec{r}_4) = 10\hat{a}_x$$

$$|\vec{r}_1 - \vec{r}_4| = \sqrt{10^2} = 10\text{m}$$

\vec{F}_R di q_1 tersebut menjadi F

$$F = k \frac{q_1 q_2 (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3} + k \frac{q_1 q_2 (\vec{r}_1 - \vec{r}_3)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_3|^3} + k \frac{q_1 q_2 (\vec{r}_1 - \vec{r}_4)}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_4|^3}$$

$$F = 9 \times 10^9 \frac{\frac{100}{9} \times 10^{-6} \cdot 30 \times 10^{-3} (10\hat{a}_y)}{10^3} + 9 \times 10^9 \frac{\frac{100}{9} \times 10^{-6} \cdot 40 \times 10^{-3} (10\hat{a}_x)}{10^3}$$

$$+ 9 \times 10^9 \frac{\frac{100}{9} \times 10^{-6} \cdot 50 \times 10^{-3} (-10 \hat{a}_z)}{10^3}$$

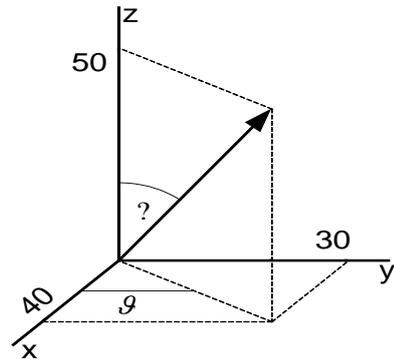
$$F = 30 \hat{a}_y + 40 \hat{a}_x - 50 \hat{a}_z$$

$$F = 40 \hat{a}_x + 30 \hat{a}_y - 50 \hat{a}_z$$

$$F = \sqrt{40^2 + 30^2 - 50^2} = \sqrt{5000} = 70,71$$

$$\theta = \operatorname{invcos} \left[\frac{F_z}{F} \right] = \operatorname{invcos} \left[\frac{50}{70,71} \right] = \operatorname{invcos}(0,7071) \quad \theta = 45^\circ$$

$$\vartheta = \operatorname{invtg} \left[\frac{F_y}{F_x} \right] = \operatorname{invtg} \left[\frac{30}{40} \right] = \operatorname{invtg}(0,75) = 36,87^\circ$$



3.3 Evaluasi

Untuk mengetahui apakah saudara memahami modul yang telah dipelajari selesaikanlah soal-soal dibawah ini :

1. Tentukanlah vektor dan jarak antara dua titik dibawah ini :

a) $A(1,2,3)$ $B(9,8,3)$ $\vec{A} = \dots\dots\dots ?$ $\vec{B} = \dots\dots\dots ?$

$\vec{AB} = \dots\dots\dots ?$ $|AB| = \dots\dots\dots ?$

b) $E(3,4)$ dan $D(9,14,8)$

$\vec{C} = \dots\dots\dots ?$ $\vec{D} = \dots\dots\dots ?$ $\vec{CD} = \dots\dots\dots ?$

$|\vec{CD}| = \dots\dots\dots ?$

$\hat{A}_{CD} = \dots\dots\dots ?$

2. Jika pada soal 1.a pada titik A terdapat muatan-muatan $q_1 = \frac{100}{9} \mu C$

dan titik B terdapat muatan $q_2 = 50mC$ tentukan \vec{F}_{12} dan \vec{F}_{21}

3. Diberikan muatan sebagai berikut :

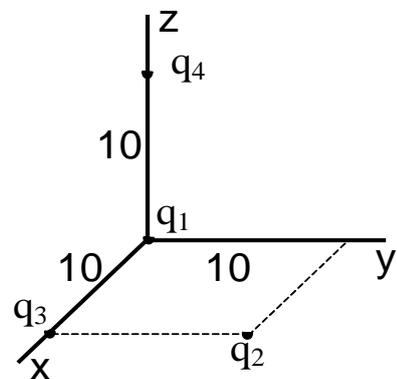
$q_1 = 10\mu C$

$q_2 = 20mC$

$q_3 = 5mC$

$q_4 = 30mC$

Tentukan F di q_1



MODUL IV

FISIKA LISTRIK MAGNET

MEDAN LISTRIK

Tujuan Instruksi Umum :

Setelah mempelajari pokok bahasan ini mahasiswa dapat menganalisis medan listrik dengan menggunakan hukum coulomb.

Tujuan Instruksional khusus :

- Menjelaskan pengertian medan listrik
- Menghitung medan listrik akibat suatu muatan titik
- Menghitung medan listrik akibat banyak muatan titik
- Menghitung medan listrik akibat muatan kontinu.

Buku Rujukan :

- | | |
|------------------------------|---------------------------------|
| • Kane & Sternheim | Physics 3 rd Edition |
| • Sears & Zemansky | University Physics |
| • Sutrisno | Fisika Pasar IV IIB |
| • Larry Gonide & ART Huffman | The Cartoon Guide To Physics |
| • Johannes Surya | Olimpiade Fisika |

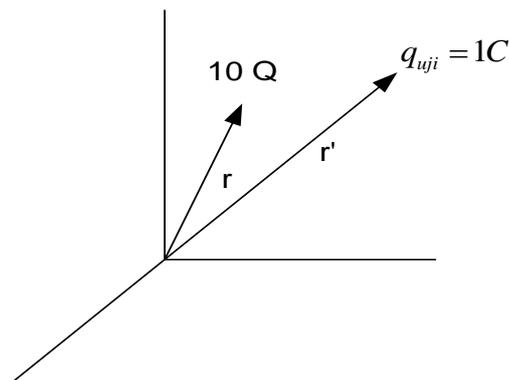
4.1 Pengertian Medan Listrik

Sebagai analogi perhatikan medan gravitasi bagaimana gaya tarik bumi mengenai benda-benda disekitar bumi walaupun tidak bersentuhan tapi benda-benda yang dekat ke bumi dapat ditarik ke bumi sehingga jatuh ke bumi. Dalam hal ini dikatakan bahwa di sekitar bumi terdapat medan gaya yang lebih dikenal dengan *medan gravitasi bumi*.

Seperti halnya medan gravitasi, disekitar muatan listrik jika disimpan muatan lain maka muatan tersebut akan mengalami gaya tarik atau gaya tolak dari muatan sumber dan daerah disekitar muatan yang jika disimpan muatan lain masih dapat ditarik atau ditolak maka daerah tersebut dinamakan terdapat *medan gaya listrik* atau lebih dikenal dengan sebutan *medan listrik* sehingga dapat disimpulkan bahwa medan listrik adalah daerah disekitar muatan sumber yang jika disimpan muatan lain masih mendapat gaya interaksi dari muatan sumber tersebut.

4.2 Kuat Medan (Intensitas Medan)

Kuat medan listrik disuatu titik yang diakibatkan oleh sumber medan berhubungan dengan gaya yang dialami oleh muatan lain. Kuat medan listrik disuatu titik dapat didefinisikan sebagai : Harga (besarnya) gaya yang dialami oleh muatan uji sebesar satu satuan (1 coloumb) dititik tersebut.



Medan listrik di r' adalah :

$$E(r') = f(r') \text{ Jika } q_{\text{Uji}} = 1 \text{ c}$$

$$E(r') = k \frac{q_s q_{\text{uji}} (\bar{r}' - \bar{r})}{|r' - r|^3}$$

$$= k \frac{q_s \cdot 1 (\bar{r}' - \bar{r})}{|r' - r|^3}$$

$$E(r') = k \frac{q_s (\bar{r}' - \bar{r})}{|r' - r|^3}$$

Dari definisi diatas dapat pula dinyatakan dalam bentuk lain bahwa kuat medan listrik di suatu titik adalah sama dengan gaya di titik tersebut dibagi oleh muatan di titik tersebut.

$$E(r') = \frac{F(r')}{q_{\text{uji}}}$$

Atau sederhananya :

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

atau

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

Contoh :

- a. Hitunglah kuat medan listrik di suatu titik (12,8,10)m yang diakibatkan oleh muatan sebesar $1\mu\text{c}$ yang terletak pada titik (6,0,10)m.
- b. Jika titik yang telah dicarimedannya disimpan muatan $\frac{10}{9}mc$

Jawab :

a. $\vec{r} = 6\hat{a}_x + 10\hat{a}_z$

$$\vec{r}' = 12\hat{a}_x + 8\hat{a}_y + 10\hat{a}_z$$

$$\begin{aligned}(r' - r) &= (12\hat{a}_x + \hat{a}_y + 10\hat{a}_z) - (6\hat{a}_x + 10\hat{a}_z) \\ &= 6\hat{a}_x + 8\hat{a}_y\end{aligned}$$

$$|r' - r| = \sqrt{6^2 + 8^2} = \sqrt{36 + 64} = \sqrt{100} = 10m$$

$$E(r') = k \frac{q_s \cdot q(\vec{r}' - \vec{r})}{|r' - r|^3}$$

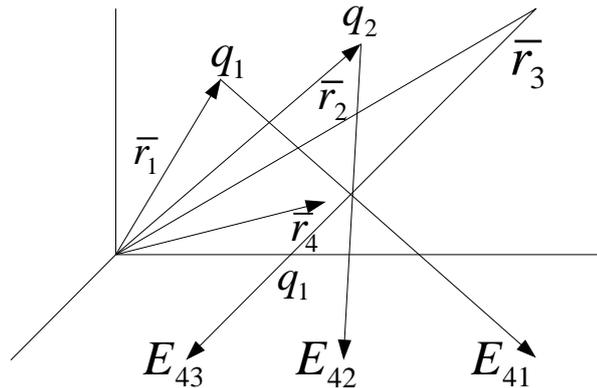
$$= 9 \times 10^9 \frac{1 \times 10^{-6} (6\hat{a}_x + 8\hat{a}_y)}{10^3}$$

$$E(r') = 9(6\hat{a}_x + 8\hat{a}_y) \text{ N/C} = (54\hat{a}_x + 72\hat{a}_y) \text{ N/C}$$

b. $F(r') = qE(r') = \frac{10}{9} \times 10^{-3} (54\hat{a}_x + 72\hat{a}_y) = (6\hat{a}_x + 8\hat{a}_y) \times 10^{-3} \text{ N}$

4.3 Medan gaya listrik akibat muatan listrik yang banyak

Kuat medan listrik adalah besaran vektor dengan demikian operasi penjumlahannya pun menggunakan metode penjumlahan vektor, seperti halnya pada gaya interaksi listrik akibat muatan yang banyak maka cara perhitungannya sama. Misal kita memiliki tiga Muatan terpisah dan ingin dicari medan listriknya disuatu titik dapat dilakukan penyelesaian sbb:



$$\vec{E}R = \vec{E}_{41} + \vec{E}_{42} + \vec{E}_{43}$$

$$\vec{E}R = k \frac{q_1(\vec{r}_4 - \vec{r}_1)}{|r_4 - r_1|^3} + k \frac{q_2(\vec{r}_4 - \vec{r}_2)}{|r_4 - r_2|^3} + k \frac{q_3(\vec{r}_4 - \vec{r}_3)}{|r_4 - r_3|^3}$$

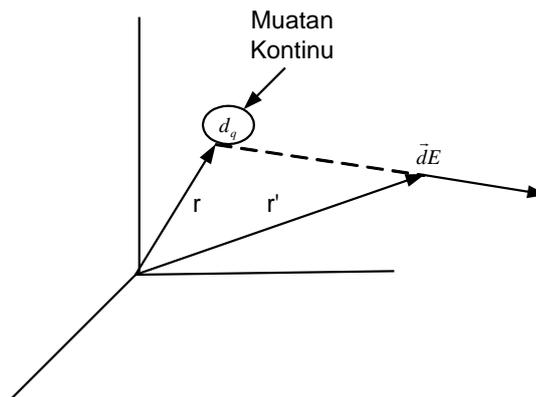
Soal :

Untuk menerapkan persamaan di atas coba lakukan perhitungan untuk mencari medan di pusat koordinat dari muatan-muatan sebagai berikut :

Jika $q_1 = 10\sqrt{2}\mu c$, $q_2 = 20\sqrt{2}\mu c$, $q_3 = 10mc$,

4.4 Medan Listrik Akibat Muatan Kontinu

Jika jarak antara muatan jauh lebih kecil dibandingkan dengan jarak antara muatan ke titik yang ingin diketahui medannya muatan dianggap merupakan satu kesatuan yang rapat (kontinu) maka untuk mendapatkan dari kondisi muatan seperti ini dapat diselesaikan dengan tahapan-tahapan sbb:



Ambil bagian kecil dari muatan sebesar dengan dan asumsikan senagai muatan titik maka akan didapat bagian kecil dari medan listrik sebesar \vec{dE}

$$\vec{dE} = k \frac{dq(\vec{r}' - \vec{r})^3}{|r' - r|}$$

Dimana : $dq = \rho_v v$ untuk muatan ruang

$dq = \rho_s ds$ untuk muatan bidang

$dq = \rho_l dl$ untuk muatan garis.

Untuk mendapatkan hasil E maka dilakukan penjumlahan secara kontinu atau dengan perkataan lain diintegrasikan

$$\vec{E} = \int \vec{dE}$$

$$E = \iiint k \frac{\rho_v dV(\vec{r}'-\vec{r})}{|\vec{r}'-\vec{r}|^3} \quad \text{Untuk Muatan Ruang}$$

$$E = \iint k \rho_s \frac{ds(\vec{r}'-\vec{r})}{|r'-r|^3} \quad \text{Untuk Muatan Bidang}$$

$$E = \int k \frac{\rho_l dl(\vec{r}'-\vec{r})}{|r'-r|^3} \quad \text{Untuk Muatan Garis}$$

Keterangan :

$$\rho_v = \text{Rapat Muatan Ruang} \left(\frac{dq}{dv} \right)$$

$$\rho_s = \text{Rapat Muatan Ruang} \left(\frac{dq}{ds} \right)$$

$$\rho_l = \text{Rapat Muatan Ruang} \left(\frac{dq}{dl} \right)$$

$$\rho_v = \text{Unsur / Bagian Dari Volume}$$

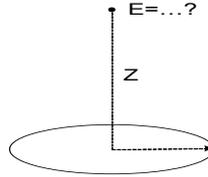
$$\rho_s = \text{Unsur / Bagian Dari Permukaan}$$

$$\rho_l = \text{Unsur / Bagian Dari Garis.}$$

Untuk menyelesaikan integral seperti di atas tidaklah terlalu mudah tetapi biasanya dilakukan pendekatan-pendekatan fisik agar dapat diselesaikan dengan baik.

Contoh :

1. mencari medan listrik pada sumbu muatan berbentuk cincin dengan jari-jari r m dan kerapatan muatan merata sebesar $\rho \text{ C/m}$



Penyelesaian :

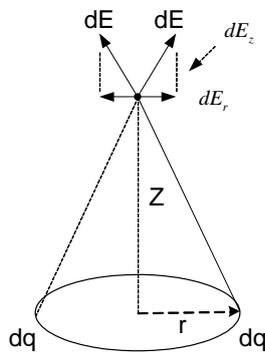
Tentukan pusat koordinat pada titik tengah cincin jarak muatan ke pusat koordinat adalah r sehingga,

$$\vec{r} = \hat{a}_r r$$

\hat{a}_r menunjukkan Arah Radial (Arah Penambahan Besar Jari-jari)

Jarak dari pusat koordinat ke titik yang ingin ,dicari mendannya $r' = \hat{a}_z z$

Disetiap dq mempunyai pasangan dengan dq yang berseberangan



$$dE = k \frac{dq(\vec{r}' - \vec{r})}{|\vec{r}' - \vec{r}|^3}$$

$$(\vec{r}' - \vec{r}) = \hat{a}_z z - \hat{a}_r r$$

$$|\vec{r}' - \vec{r}| = (z^2 + r^2)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots \text{.phyta goras}$$

$$dE = k \frac{dg(\vec{a}_z z - \vec{a}_r r)}{(z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} = k \frac{dqz\vec{a}_z}{(z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \dots k \frac{dq r\vec{a}_r}{(z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Terlihat dari gambar karena setiap dq ada pasangan dq di seberangnya dan vektor dE dapat diuraikan menjadi dE yang arahnya radial adalah $d\vec{E}$ dan menjadi dE yang arahnya vertical ke arah sb z yakni dE_z

$$\vec{dE} = d\vec{E}_z + d\vec{E}_r$$

Tetapi jika dicari resultan dari dE yang berpasangan dE_r saling meniadakan, sehingga

$$\sum dE = \sum dE_z + \sum^{dE_r}$$

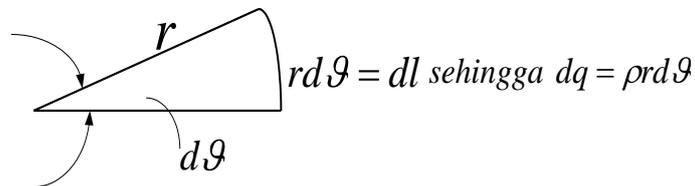
$$\sum dE = \sum dE_z + 0$$

Sehingga,

$$E = \int dE = \int dE_z$$

$$E = \int k \frac{dq z \vec{a}_z}{(z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \quad \text{dimana } dq = \rho dl$$

Perhatikan dq



$$E = \int k \frac{\rho z r d\theta}{(z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}$$

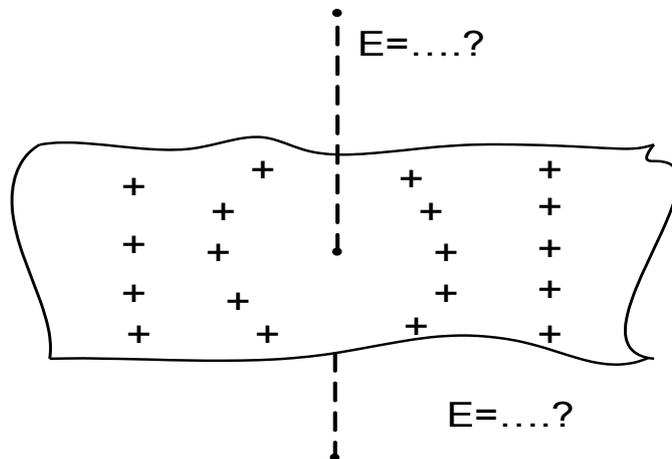
$$= k \frac{\rho z r \theta \Big|_0^{2\pi}}{(z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \hat{a}_z = k \frac{\rho z 2\pi r}{(z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \hat{a}_z$$

$$E = k \frac{z \rho 2\pi r}{(z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \hat{a}_z$$

$$\rho(2\pi r) = Q$$

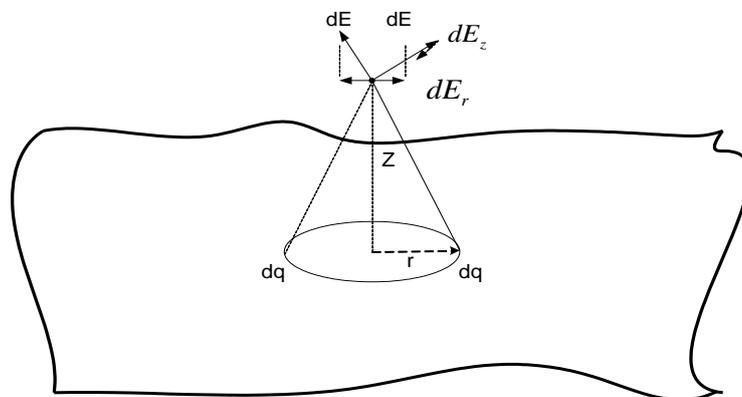
$$E = k \frac{zQ}{(z^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}} \hat{a}_z$$

2. Sebuah muatan yang berbentuk lempengan yang sangat besar dengan kerapatan homogen sebesar



Penyelesaian :

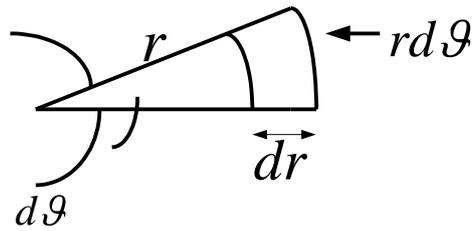
Ambil sample berbentuk lingkaran dan tengah lingkaran dianggap sebagai pusat koordinat polar.



$$dq = \sigma \cdot ds$$

$$ds = r d\theta dr$$

$$= r dr d\theta$$



$$dE = k \frac{dq \vec{r}' - \vec{r}}{|r' - r|^3} = k \frac{\sigma ds \vec{r}' - \vec{r}}{|r' - r|^3}$$

$$r = \hat{a}_r r$$

$$r' = \hat{a}_z z$$

$$\vec{r}' - \vec{r} = (\hat{a}_z z - \hat{a}_r r)$$

$$|r' - r| = \left[z^2 + r^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$dE = k \frac{\sigma dq \hat{a}_z z - \hat{a}_r r}{\left(z^2 + r^2 \right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$dE = k \underbrace{\frac{\sigma dq \hat{a}_z z}{\left(z^2 + r^2 \right)^{\frac{3}{2}}}}_{dE_z} - k \underbrace{\frac{\sigma ds \hat{a}_r r}{\left(z^2 + r^2 \right)^{\frac{3}{2}}}}_{dE_r}$$

Karena simetri setiap dq ada pasangan maka bagian dE_r saling menghilangkan,

$$\sum dE = \sum dE_z + \sum 0 dE_r$$

$$\sum dE = \sum dE_z = \sum k \frac{\sigma ds z \hat{a}_z}{\left(z^2 + r^2 \right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$E = \iint dE$$

$$\begin{aligned}
 E &= \iint k \frac{\sigma dq \hat{z}}{(z^2 + r^2)^{3/2}} \\
 &= k\sigma z \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{r dr}{(z^2 + r^2)^{3/2}} \\
 &= \int_{r=0}^\infty \int_{\vartheta=0}^{2\pi} k \frac{\sigma z r dr d\vartheta}{(z^2 + r^2)^{3/2}} \hat{z} \\
 &= k\sigma z \pi \left(\frac{1}{(z^2 + r^2)^{1/2}} \Big|_0^\infty \right) \hat{z} \\
 &= k\sigma z \pi \left(\frac{1}{z} \right) \hat{z}
 \end{aligned}$$

$$\boxed{\vec{E} = k\sigma \pi \hat{z}}$$

Jika $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \hat{z}$

Maka,

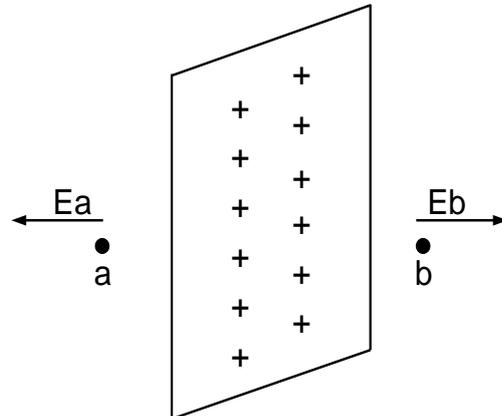
$$E = \frac{2\pi\sigma}{4\pi\epsilon_0} \hat{z}$$

$$\boxed{E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \hat{z}}$$

Arah Medan Listrik Di Suatu Titik

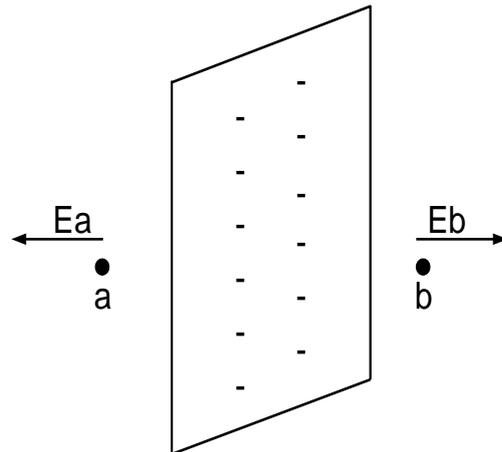
Didefinisikan sama seperti arah gaya listrik , jika dititik tersebut disimpan muatan positif :

1.



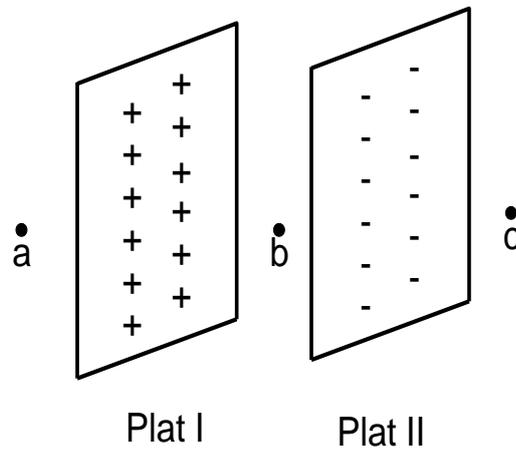
Arah medan dititik a ke kiri
Dan arah medan di b ke kanan
Sebab jika di titik a dan b disimpan
Muatan positif arah gayanya
seperti itu!

2.



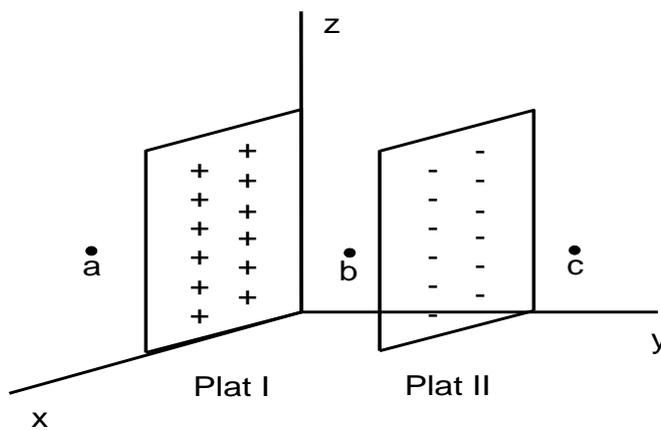
Analog dengan
penjelasan di atas

3. Latihan, Gambarkan arah medan di titik a, b, c jika diberikan titik-titik sebagai berikut :



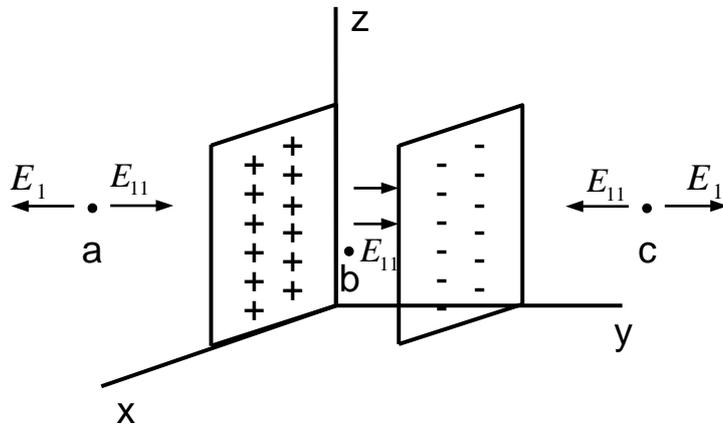
4. Contoh Penggunaan :

1. Mencari medan listrik diantara plat paralel.



Kerapatan muatan
Homogen $\sigma \text{ C/m}^2$
Cari E_a, E_b, E_c

Penyelesaian :



Di titik (a) $E_a = \vec{E}_1 + \vec{E}_{11}$

$$= -\hat{a}y \frac{\sigma}{2\epsilon_o} + \hat{a}y \frac{\sigma}{2\epsilon_o} = 0$$

(b) $\vec{E}b = \vec{E}_1 + \vec{E}_{11}$

$$= \hat{a}y \frac{\sigma}{2\epsilon} + \hat{a}y \frac{\sigma}{2\epsilon} = \hat{a}y \frac{\sigma}{\epsilon_o}$$

(c) $E_c = E_1 + E_{11}$

$$= \hat{a}y \frac{\sigma}{2\epsilon_o} - \hat{a}y \frac{\sigma}{2\epsilon_o} = 0$$

Kesimpulan :

Medan diantara plat yang berpasangan dengan kerapatan muatan yang sama

$$\frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

adalah $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$ sedang di luar plat dan berbeda polaritas medannya nol.

Terlihat dari gambar karena setiap dq ada pasangan dq di seberangnya dan vektor dE dapat diuraikan menjadi dE yang arahnya radial adalah $d\vec{E}$ dan menjadi dE yang arahnya vertical ke arah sumbu z yakni dE_z

$$d\vec{E} = d\vec{E}_z + d\vec{E}_r$$

Tetapi jika dicari resultan dari dE yang berpasangan dE_r saling meniadakan.

MODUL V
FISIKA LISTRIK MAGNET
GARIS GAYA LISTRIK & FLUKS LISTRIK

Tujuan Instruksional Umum

Setelah mempelajari pokok bahasan ini, mahasiswa diharapkan memahami garis gaya listrik, fluks listrik dan penerapan perhitungan.

Tujuan Instruksional Khusus

- Menjelaskan definisi khusus
- Menghitung fluks Listrik
- Menerapkan perhitungan fluks dari sebuah permukaan tertutup

Buku Rujukan :

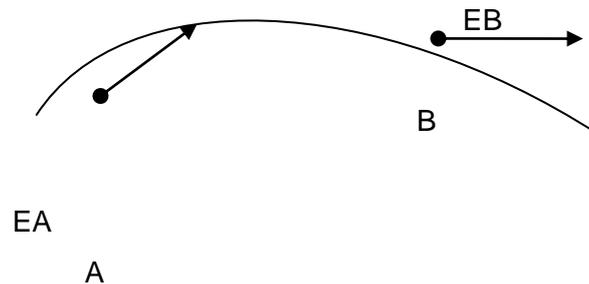
- | | |
|-------------------|--------------------------------|
| ▪ Kane Stern Hein | Physic 3 rd Edition |
| ▪ Sears Zemanky | University Physic |
| ▪ Sutrisno | Fisika Dasar IV ITB |
| ▪ Johanes Surya | Olimpiade Fisika |

Garis Gaya Listrik

Untuk menggambarkan arah medan listrik disetiap titik yang diakibatkan oleh sumber muatan mengkhayalkannya dengan apa yang disebut garis gaya.

Dalam bentuk definisi garis gaya adalah :

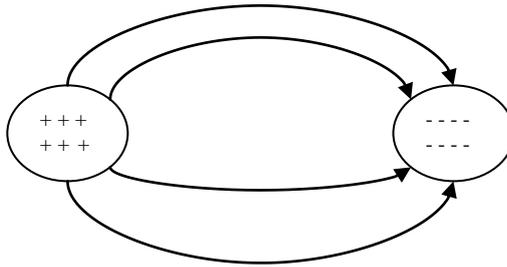
- Garis khayal yang ditarik sedemikian rupa sehingga arah medan setiap titik garis merupakan garis singgung dari garis gaya dititik tersebut untuk lebih jelasnya perhatikan gambar dibawah ini :



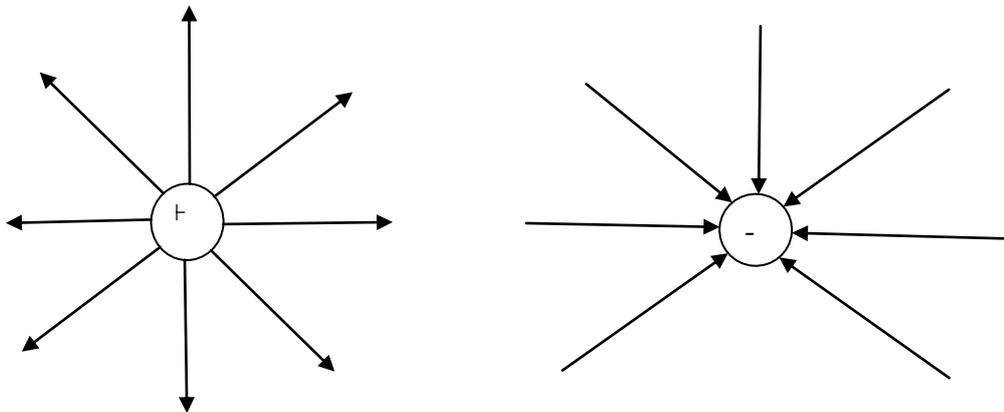
Gambar 5.1 Arah medan listrik di titik A dan B

Gambar 5.1 Arah medan listrik di titik A dan di titik B merupakan garis singgung dari garis gaya di titik tersebut .

Garis gaya listrik dalam medan elektro statistic berawal dari muatan positif dan berakhir pada muatan negatif.



Gambar 4.2 garis gaya keluar dari muatan positif menuju muatan negative tetapi jika hanya sekumpulan muatan positif saja atau negative saja maka garis gaya keluar dari muatan positif menuju ke tempat yang tak terhingga (pootensial nol) untuk muatan negative sebaliknya yakni dari tak terhingga menuju muatan tersebut seperti pada gambar dibawah ini :



Gambar. 5.3

- a. Arah garis gaya dari muatan positif b. Arah garis gaya dari muatan negative

Untuk pasangan muatan sejenis garis gaya dipetakan sebagai berikut :

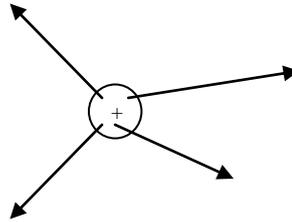


Gambar 5.4

- (a). pasangan muatan positif
negative

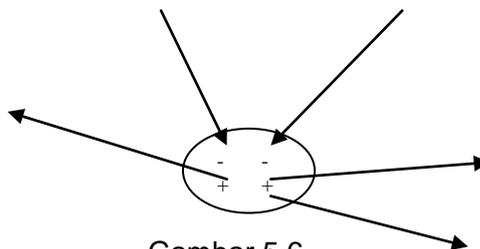
- (b). pasangan muatan

- Satu garis gaya listrik menggambarkan satu muatan listrik



Gambar 5.4 sebuah muatan listrik difrensientasikan oleh 4 garis gaya.

- Netto garis gaya keluar atau masuk dari permukaan tertutup sama dengan netto muatan yang ada di dalam permukaan tertutup tersebut.



Gambar 5.6

$$\text{Netto muatan} = 4 - 2 = 2$$

$$\text{Netto garis gaya} = 4 - 2 = 2$$

Fluks listrik adalah jumlah garis gaya menembus permukaan, karena netto garis gaya dan netto yang terdapat pada ruang tertutup jumlahnya sama maka satuan fluks dan satuan muatan adalah sama.

Untuk permukaan bidang di definisikan :

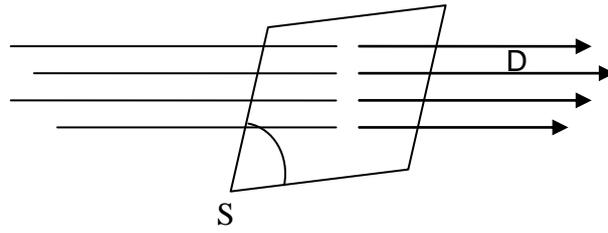
Untuk permukaan bidang di definisikan :

$$\phi = \iint \vec{D} \cdot d\vec{s}$$

Dimana : ϕ = Fluks (coloumb)

\vec{D} = Intersitas fluks (kerapatan fluks) dalam satuan cm^2

$d\vec{s}$ = unsur / bagian dari luas bidang



Gambar 5.7

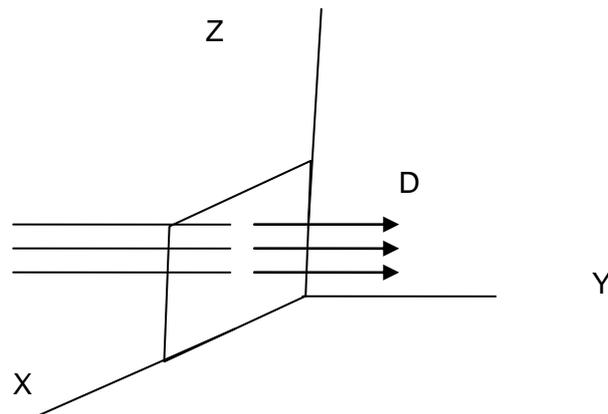
Untuk kasus D konstan terdapat unsur ds maka $\phi = \vec{D} \cdot \vec{S} = DS$

$\vec{D} = \vec{a}_D D$; \vec{a}_D menunjukkan unit vektor D untuk koordinat karkisian \vec{a}_D berupa \vec{a}_x atau \vec{a}_z

$\vec{S} = \vec{a}_n S$; \vec{a}_n arah normal S yakni arah tegak lurus permukaan keluar

$\vec{D} \cdot \vec{S}$ adalah dot product dari dua vektor

Contoh :



Diberikan

$$D = 10 \text{ cm}^2 \quad S = 20 \text{ m}^2$$

Ingin diketahui fluks listriknya

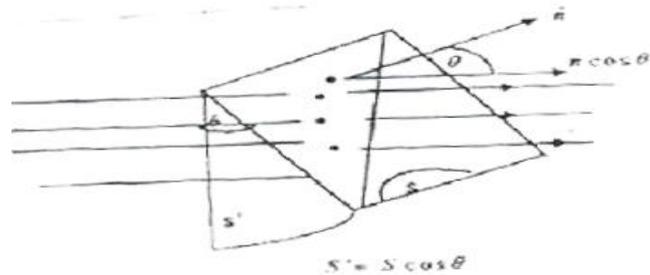
Penyelesaian :

$$\vec{D} = \vec{a}_y D = \vec{a}_y 10 \text{ cm}^2$$

$$S = \vec{a}_y S = \vec{a}_y 20 \text{ m}^2$$

$$\phi = \vec{D} \cdot \vec{S} = \vec{a}_y 10 \cdot \vec{a}_y 20 = 200 \text{ C}$$

Untuk bidang arah normalnya tidak sejajar dengan arah D berlaku aturan dot product antara dua vektor



$$\phi = \vec{D} \cdot \vec{S} = DS' = DS \cos \theta$$

atau

$$\phi = \vec{D} \cdot \vec{S} = \vec{D} \cdot \vec{n}_1 S = D \cdot S \cos \theta$$

Untuk muatan yang berada pada permukaan tertutup berlaku persamaan :

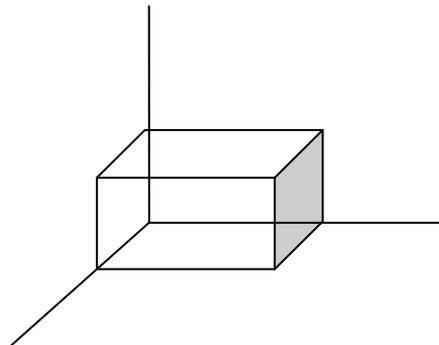
$$\phi = \oiint \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q_{enclose}$$

\oiint simbol untuk integral permukaan tertutup

◆ Khusus untuk balok

$$\oiint ds = \iint ds_1 + \iint ds_2 + \iint ds_3 + \iint ds_4 + \iint ds_5 + \iint ds_6$$

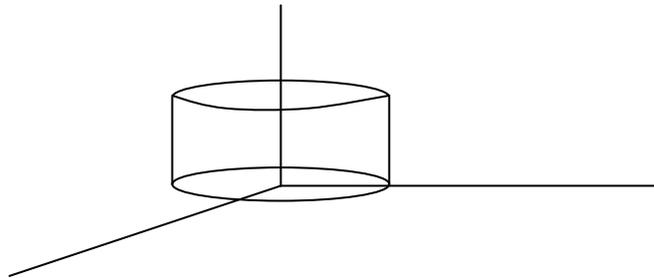
T.atas T.bawah T.kiri T.kanan T.bawah T.belakang



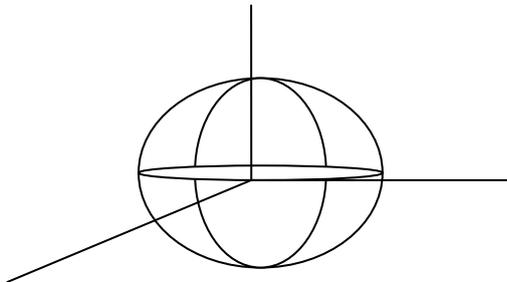
◆ Khusus Khusus Silinder

$$\oiint ds = \iint ds_1 + \iint ds_2 + \iint ds_3$$

T. atas T. bawah T. selimut



◆ Khusus permukaan Bola



$$\oiint ds = \iint ds$$

Bola punya satu permukaan tertutup

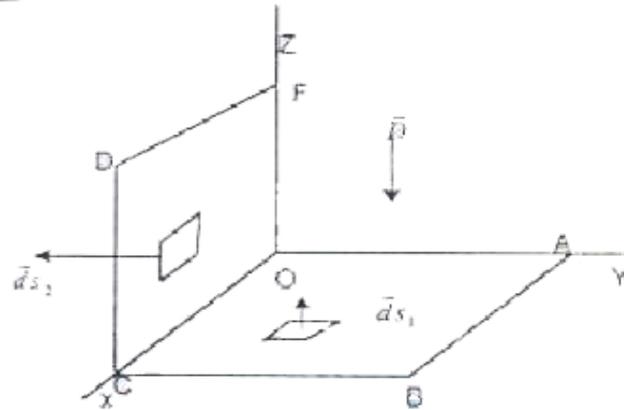
Contoh-contoh perhitungan fluks :

1. Dalam ruang ada kerapatan fluks homogen sebesar 20 cm^2 berarah ke sumbu Z negatif terhitung garis yang keluar dari
 - a. Bidang OABC pada bidang x-y 2 m^2
 - b. Bidang OFDC pada bidang x-z 2 m^2

Penyelesaian :

$$\vec{D} = -\hat{a}_z 20 \text{ cm}^2$$

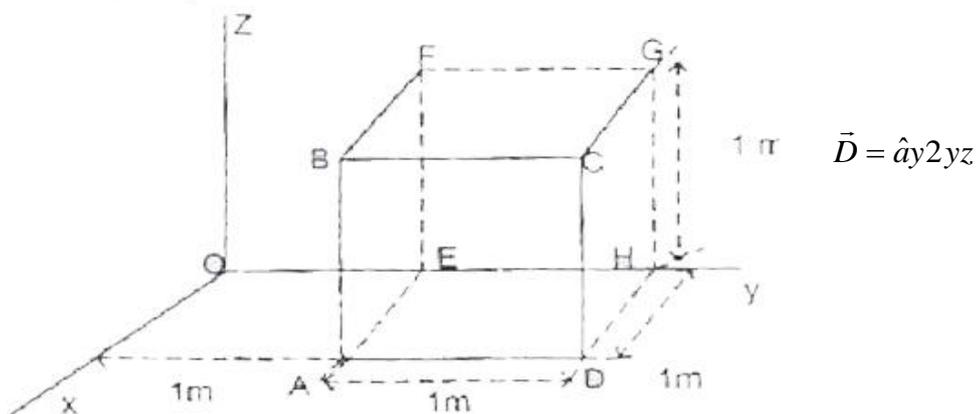
Gambarkan bidang yang diberikan



$$\text{a. } \phi = \int_{OABC} \vec{D} \cdot d\vec{s}_1 = \vec{D} \cdot \vec{S} = (-\hat{a}_z 20) \cdot (\hat{a}_z 2) = -40$$

$$\text{b. } \phi = \int_{OPCD} \vec{D} \cdot d\vec{s}_2 = \vec{D} \cdot \vec{S}_2 = -\hat{a}_z 20 \cdot (\hat{a}_y 2) = 0$$

2. Sebuah kotak seperti sebuah gambar dibawah ini terletak dalam medan listrik sejajar sumbu Y positif dan mempunyai bentuk



Hitunglah fluks yang keluar dari bidang :

- OCGH
- BCGF
- ABEF
- Fluks untuk seluruh permukaan tertutup kubus di atas ?

Jawab :

$$\begin{aligned}
 \text{a. } \phi &= \int_{DCGH} \vec{D} \cdot \vec{S} \\
 \vec{D} &= \hat{a}_y ds \rightarrow d\vec{S} = \hat{a}_y dx dy \\
 \phi &= \int_{x=0}^1 \int_{z=0}^1 \hat{a}_y 4z \cdot \hat{a}_y dx dy = \int_{x=0}^1 \int_{z=0}^1 4z dx dy
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{b. } \phi &= \frac{4}{2} \hat{a}_y \int_0^1 \int_0^1 dz dy = 2(1)^2(1) = 2C \\
 d\vec{S} \text{ untuk BCGF} &\Rightarrow ds = \hat{a}_z dx dy \\
 \phi &= \iint \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iint \hat{a}_y z y z = \hat{a}_y dx dy = 0 \\
 \text{ingat } \hat{a}_y \cdot \hat{a}_z &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{c. } \phi &= \int_{ABFE} \vec{D} \cdot d\vec{S} \\
 \text{pada bidang ABFE } &y=1 \text{ sehingga} \\
 \vec{D} &= \hat{a}_y a y z = \hat{a}_y 2(1) = \hat{a}_y 2z \\
 d\vec{S} &= -\hat{a}_y dx dz \\
 \text{maka } \phi &= \int_{ABFE} \hat{a}_y 2z (-\hat{a}_y dx dz) \\
 &= - \int_{x=0}^1 \int_{z=0}^1 2z dx dz \\
 &= -2 \left(\frac{1}{2} \right) (1) = -1C
 \end{aligned}$$

e. Untuk seluruh permukaan tertutup gunakan integral permukaan tertutup

$$\oiint \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iint_{DCGH} \vec{D} \cdot d\vec{s} + \iint_{BCGF} \vec{D} \cdot d\vec{s} + \iint_{ABFE} \vec{D} \cdot d\vec{s} + \iint_{AEHD} \vec{D} \cdot d\vec{s} + \iint_{ADCB} \vec{D} \cdot d\vec{s} + \iint_{EFGH} \vec{D} \cdot d\vec{s}$$

gunakan aturan dot product antar vektor maka

$$\iint_{BCFG} \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iint_{ADCB} \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iint_{AEHD} \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iint_{EFGH} \vec{D} \cdot d\vec{s} = 0$$

$$\oiint \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iint_{DCGH} \vec{D} \cdot d\vec{s} + \iint_{ABFE} \vec{D} \cdot d\vec{s} = 2 - 1 = 1 \text{ coloumb}$$

6.1 Hukum Gauss

Seperti telah dijelaskan pada modul 5 tentang pengertian garis gaya listrik, kerapatan fluks dan netto fluks listrik yang dilengkapi oleh permukaan tertutup dapat dinyatakan dalam hukum Gauss sebagai berikut :

“Jumlah garis gaya yang keluar dari suatu permukaan tertutup sama dengan jumlah muatan yang dilingkupi oleh permukaan tertutup itu”

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q_{enclose}$$

atau dalam bentuk lain ditulis

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{\sum q_i}{\epsilon_0}$$

dimana : D = kerapatan fluks (C/m^2)

$d\vec{s}$ = unsur luas (m^2)

$Q_{enclose}$ = muatan yang dilingkupi oleh seluruh permukaan tertutup E = kuat medan listrik (N/C atau volt/m) untuk ruang vacum atau udara.

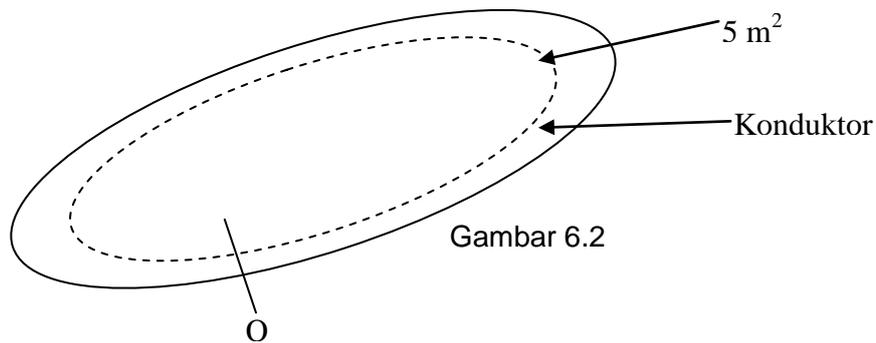
$$D = \epsilon_0 \quad \text{atau} \quad E = \frac{D}{\epsilon_0}$$

Hukum Gauss ini dapat digunakan untuk mendapatkan/menghitung medan listrik Oleh muatan yang berbentuk khusus, misal bentuk lempengan, bola, atau silinder.

Secara sederhananya dapat dijelaskan bahwa jika terdapat permukaan tertutup Sm^2 sama dengan muatan yang terdapat didalam permukaan tertutup Sm^2 .

Misalkan :

- Medan listrik didalam logam hams nol karena jika terdapat medan akan terjadi aliran muatan bebas.
- Dengan penerapan Hk Gauss untuk ambil Logam (konduktor) 4aiam ukuran sembarang, misalnya seperti pada gambar dibawah ini



Gambar 6.2

Ambil permukaan tertutup $S \text{ m}^2$ dan terapkan Hk Gauss pada permukaan $S \text{ m}^2$

$$\iint \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q_{\text{enclose}}$$

Karena pada permukaan tertutup $S \text{ m}^2$ tidak terdapat medan listrik maka pada ruang tertutup tidak terdapat muatan listrik. Jadi

$$Q = 0$$

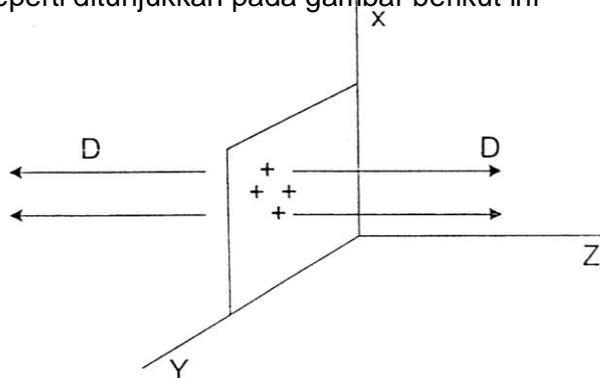
Jika diambil S mendekati seluruh permukaan tertutup dari logam maka tetap $Q = 0$, sehingga dapat disimpulkan bahwa pada konduktor muatan-muatan bebas, akan tersebar pada permukaan konduktor.

6.2.2 Plat Tipis Bermuatan

Selembaar plat tipis yang cukup lebar bermuatan merata dengan muatan total sebesar $+Q$ jika luas plat tadi $S \text{ m}^2$ maka kerapatan muatan pada plat tersebut adalah

$$\sigma = \frac{Q}{S} \left(\frac{C}{m^2} \right)$$

Arah medan yang ditimbulkan oleh plat tersebut sesuai dengan arah garis gayannya, seperti ditunjukkan pada gambar berikut ini

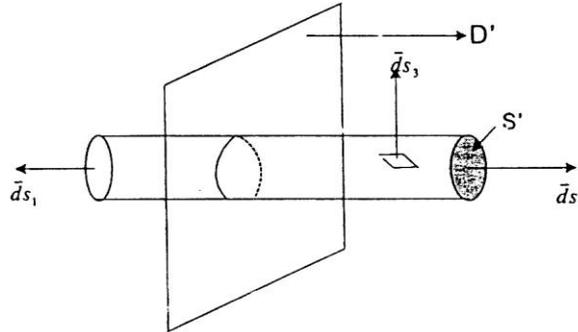


Gambar 6.3

Dari gambar, dapat diterangkan bahwa disebelah kiri plat arah medannya menuju sumbu Y negatif dan disebelah kanan plat arah medan menuju sumbu Y positif sehingga

$$\vec{D} = \pm a \vec{y} D$$

Untuk menyelesaikan persoalan ini, ambil bagian muatan yang mudah dianalisa misal berbentuk lingkaran dengan luas S' m². Perhatikan gambar :



Gambar 6.4

Terapkan Hk gauss dengan permukaan yang menutupi muatan berbentuk silinder dengan tiga bagian permukaan (muka samping kin, kanan, dan muka selimut), maka diperoleh persamaan :

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q_{enclose}$$

$$\iint_{kanan} \vec{D} \cdot d\vec{s}_1 + \iint_{kiri} \vec{D} \cdot d\vec{s}_2 + \iint_{selimut} \vec{D} \cdot d\vec{s}_3 = \sigma S'$$

Ingat dot product antara dua vektor pada permukaan selimut antara D dan ds sating tegak lurus. Dot product dari kedua vektor ini menghasilkan harga nol.

$Q_{enclose}$ adalah bagian muatan yang dilingkupi oleh seluruh permukaan tertutup silinder tersebut yakni kerapatan muatan kali luasnya (a) kali luasnya S' m².

Dan dot product antara $\vec{D} \cdot d\vec{s}$ pada bagian kanan dan kin adalah dot product dari dua vektor sejajar sehingga

$$\vec{D} \cdot d\vec{s} = D ds$$

akibatnya akan didapat :

$$\iint_{\text{kanan}} \vec{D} \cdot d\vec{s} + \iint_{\text{kiri}} \vec{D} \cdot d\vec{s} = \sigma S$$

luas permukaan kanan dan kiri adalah S' sehingga

$$D \cdot S' + D \cdot S' = \sigma \cdot S$$

$$sD = \sigma$$

$$D = \frac{\sigma}{2}$$

Karena kaitan antara D dan E adalah

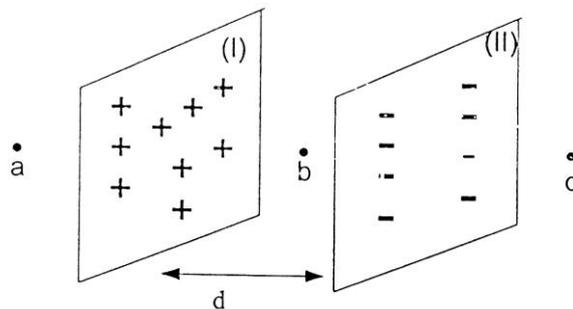
$D = \epsilon_0 E$ atau $E = \frac{D}{\epsilon_0}$ sehingga akan didapat persamaan sebagai berikut :

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Medan listrik disekitar plat tipis bermuatan.

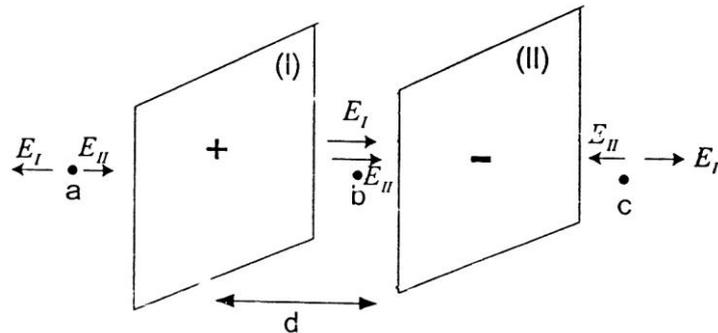
6.2.3 Plat Sejajar

Ambil plat sejajar dengan kerapatan yang muatan yang sama dan dipisahkan oleh jarak d meter sebagai berikut :



Gambar 6.5

Untuk mendapatkan nilai medan listrik dititik a, b, atau c didapat dengan ketentuan bahwa arah medan listrik di suatu titik adalah sama dengan arah gaya di titik tersebut dengan mengandaikan (menganggap) dititik tersebut terdapat muatan positif. Perhatikan gambar dibawah ini :



Gambar 6.6

Dari gambar diperoleh persamaan

$$\begin{aligned}
 E_a &= \vec{E}_I + \vec{E}_n \\
 &= -\vec{a}_y \frac{\sigma}{2\epsilon_0} + a_y \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = 0
 \end{aligned}$$

Perhatikan di titik a arah listrik akibat plat I ke kiri karena kita beranggapan titik tersebut terdapat muatan positif dan plat I bermuatan positif sehingga arah medannya ke kiri (tolak menolak), sebaliknya dengan arah medan oleh plat II Pada titik b

$$\begin{aligned}
 E_b &= E_I + E_{II} \\
 &= -\vec{a}_y \frac{\sigma}{2\epsilon_0} + a_y \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = 0
 \end{aligned}$$

Pada titik c

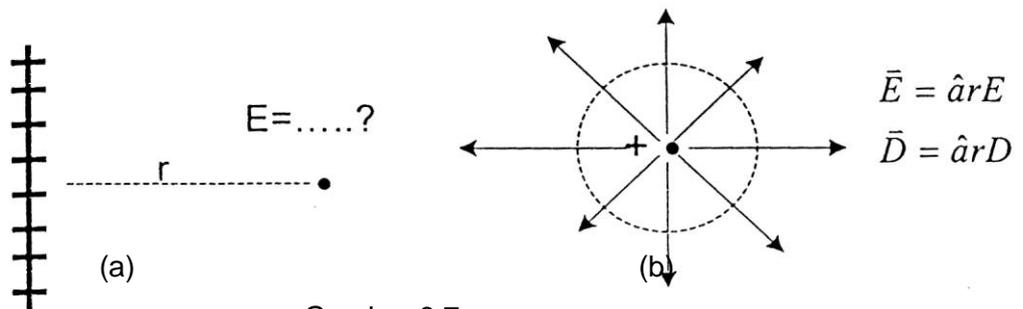
$$\begin{aligned}
 E_c &= E_I + E_{II} \\
 &= \vec{a}_y \frac{\sigma}{2\epsilon_0} - \vec{a}_y \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = 0
 \end{aligned}$$

Dari ketiga persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa : “medan listrik yang diakibatkan oleh dua plat bermuatan dengan jenis muatan berbeda dan

kerapatannya sama hanya terdapat diantara dua plat sedang di bagian luar medannya adalah nol.”

6.2.4 Medan Listrik Disekitar Muatan Berbentuk Garis

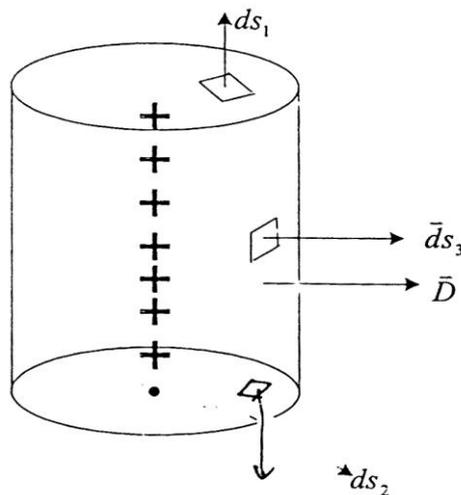
Muatan listrik berbentuk garis dengan kerapatan merata dinyatakan dalam $\lambda = \frac{Q}{L}$ $\left[\frac{C}{m} \right]$ perhatikan gambar dibawah ini :



Gambar 6.7

(a). Muatan berbentuk garis dan (b).arah medan, arah radial (arah jari-jari kelengkungan)

Untuk mendapatkan harga D dan E disekitar muatan buatlah permukaan yang menutupi muatan dengan jarak r dari muatan. Perhatikan gambar berikut :



Gambar 6.8

Dari gambar terlihat di permukaan selimut tabung arah \vec{D} selalu sejajar dengan arah \vec{ds} tapi pada permukaan tutup atas dan bawah arah \vec{D} tegak lurus arah dengan \vec{ds} sehingga yang punya harga dan dot product $\vec{D} \cdot \vec{ds}$ hanya pada permukaan selimut tabung.

$$\oint \vec{D} \cdot \vec{ds} = Q_{enclose}$$

$$\iint_{T_{atas}} \vec{D} \cdot \vec{ds} + \iint_{T_{bawah}} \vec{D} \cdot \vec{ds}_2 + \iint_{selimut} \vec{D} \cdot \vec{ds}_3 = Q_{enclose}$$

$$0 + 0 + \iint_{selimut} \vec{D} \cdot \vec{ds}_3 = \lambda L$$

Sedang luas selimut selinder adalah $S = 2\pi rL$ sehingga :

$$\boxed{\begin{aligned} D(2\pi rL) &= \lambda L \\ D &= \frac{\lambda}{2\pi r} \end{aligned}}$$

Dan

$$\boxed{E = \frac{D}{\epsilon_0} = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}}$$

MODUL VII

FISIKA LISTRIK MAGNET

POTENSIAL LISTRIK

Tujuan instruksional umum :

Setelah mempelajari pokok bahasan ini mahasiswa diharapkan dapat menganalisis potensial listrik.

Tujuan Instruksional Khusus :

Setelah mempelajari pokok bahasan ini mahasiswa diharapkan dapat :

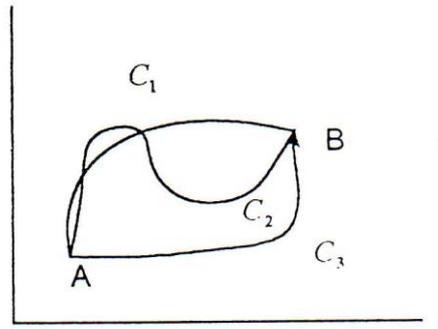
- Menjelaskan pengertian energi potensial listrik
- Menghitung energi potensial listrik
- Menghitung beda potensial listrik
- Menghitung potensial listrik pada satu titik

Buku Rujukan :

- | | |
|------------------|---------------------------------|
| ▪ Kane Sternheim | Physics 3 rd Edition |
| ▪ Sears zemansky | University Physics |
| ▪ Sutrisno | Fisika Dasar IV ITB |
| ▪ Johanes Surya | Olimpiade Fisika |

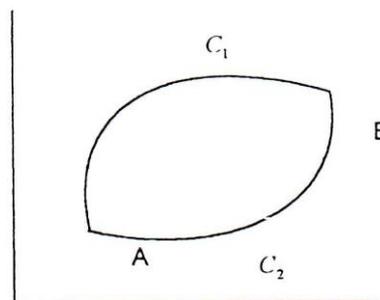
7.1 Kerja Pada Medan Listrik

Pada medan yang bersifat konservatif kerja yang dilakukan oleh medan gaya tersebut tak bergantung pada jalan yang diambil.



Gambar 7.1 Kerja pada medan konservatif A ke B

Pada medan konservatif yang dilakukan dari titik A ke titik B melalui lintasan C1, C2, atau C3 adalah sama besar. Dan jika kerja yang dilakukan dari titik A ke B kembali lagi ke A maka energi total yang diberikan adalah nol.



Gambar 7.2 Kerja pada lintasan tertutup

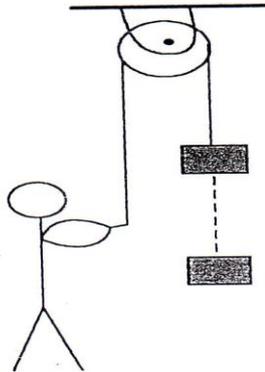
Secara matematis dapat ditulis

$$\oint \vec{F} \circ \vec{dl} = 0$$

$\int \vec{F} \circ \vec{dl}$ negatif jika energi diambil dari benda oleh pelaku gaya.

$\int \vec{F} \circ \vec{dl}$ positif jika energi diberikan oleh pelaku gaya kepada benda.

Contoh:



Gambar 7.3

1. Benda dipindahkan dari A ke B, energi diambil dari benda oleh pelaku gaya.
2. Benda dipindahkan dari B ke A energi di berikan oleh pelaku gaya kepada benda.

Pada kondisi 1 benda pindah dari energi potensial tinggi ke yang lebih rendah.

Pada kondisi 2 benda berpindah dari energi potensial rendah ke tinggi.

Jika dijumlahkan keadaan 1 dan 2 energi totalnya adalah nol.

Istilah konservatif (to conserve = mempertahankan agar tidak hilang) artinya energi yang diambil medan konservatif tidak hilang, tetapi menjadi energi simpanan.

Beberapa contoh medan gaya konservatif adalah:

- Medan gravitasi
- Medan gaya pegas
- Medan gaya Coulomb

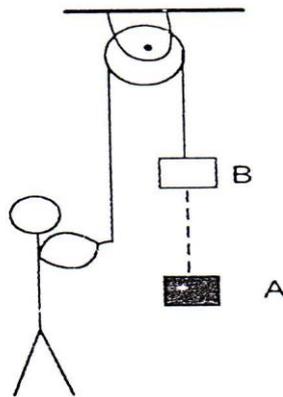
Dari penjelasan diatas

Jika tambahan energinya positif (ΔU Positif)

Yakni memindahkan benda dari energi potensial rendah ke potensial yang lebih tinggi maka pelaku gaya memberikan energi pada benda secara matematik dapat ditulis.

$$\Delta U = - \int_A^B \vec{f} \circ \vec{dl} = U(B) - U(A) \dots\dots\dots(7.1)$$

Secara fisika persamaan 7.1 dapat diartikan sebagai kerja yang harus kita lakukan melawan gaya medan F agar benda bergerak dari A ke B.

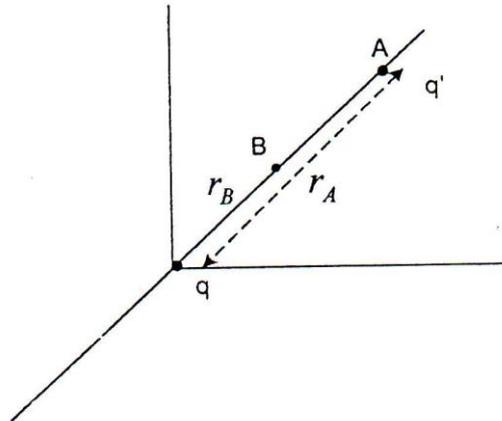


Gambar 7.4 Kerja dari A ke B melawan gaya medan

Perubahan energi potensial dapat diartikan sebagai beda energi potensial di B dengan energi potensial di A harap diperhatikan juga bahwa F bersifat konservatif, $\Delta U = U(B) - U(A) = \int \vec{F} \circ \vec{dl}$ tidak tergantung pada jalan yang diambil dari A ke B.

7.2 Energi Potensial Muatan Listrik

Misalnya kita mempunyai muatan sumber $+q$ berupa muatan titik yang terletak di pusat koordinat suatu muatan uji $+q^1$ benda pada A seperti dibawah ini



Gambar 7.5 Muatan sumber q pada titik O
Muatan uji q^1 pada titik A

Jika ingin memindahkan q^1 dari A ke B maka diperlukan energi untuk melawan gaya coulumb diatas secara matematik dapat di tulis.

$$\Delta U = U_B - U_A = - \int_A^B \vec{F} \circ d\vec{l}$$

dimana:

$$F = k \frac{qq^1}{r^2} \hat{a}_r$$

$d\vec{l} = \hat{a}_r dr$ (perpindahan terjadi pada arah radial)

$$\begin{aligned} \Delta U = U_B - U_A &= - \int_{r_A}^{r_B} k \frac{qq^1}{r^2} \hat{a}_r \cdot \hat{a}_r dr \\ &= - \int_{r_A}^{r_B} k \frac{qq^1}{r^2} dr \\ &= -k \frac{qq^1}{r} \Big|_{r_A}^{r_B} \end{aligned}$$

$$\Delta U = U_B - U_A = k \frac{qq^1}{r_B} - k \frac{qq^1}{r_A}$$

Karena beda potensial hanya bergantung pada posisi awal r_A dan posisi akhir r_B saja haruslah berlaku:

$$U_A = k \frac{qq^1}{r_A}$$

$$U_A = k \frac{qq^1}{r_B}$$

$$U(r) = k \frac{qq^1}{r_A} \dots\dots\dots 7.2$$

Persamaan 7.2 menyatakan energi muatan uji q^1 didalam medan listrik yang ditimbulkan oleh muatan sumber q bila q^1 terletak pada jarak r dari q harga energi potensial pada $r = \infty$ adalah nol.

7.3 Potensial Listrik

Jika medan gaya listrik disuatu titik adalah besarnya gaya dititik tersebut persatuan muatan, maka medan potensial listrik atau lebih dikenal dengan potensial listrik adalah energi potensial listrik persatuan muatan dititik tersebut.

$$V(r) = \frac{U(r)}{q} \text{ [joule/Coulomb lebih dikenal dengan satuan Volt]}$$

$$\text{Jika } \Delta U = U(B) - U(A) = - \int_A^B \vec{F} \circ d\vec{l}$$

$$\Delta V = U(B) - U(A) = - \int_A^B \frac{\vec{F}}{q} \circ d\vec{l}$$

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

$$\boxed{\Delta V = U(B) - U(A) = - \int_A^B \vec{E} \circ d\vec{l}} \dots\dots\dots 7.3$$

Dari persamaan 7.3 $V(B)$ atau $V(A)$ atau pada titik yang lain $V(r)$ hanya tergantung pada muatan sumber saja.

Jika kembali ke pengertian Medan adalah besarnya yang mempunyai harga pada setiap titik di dalam ruang yang ada medannya, maka energi potensial termasuk medan dan energi potensial adalah besarnya skalar, maka medan energi potensial bersifat skalar. Potensial listrik $V(r)$ tak lain ialah kuat medan energi potensialnya.

Dilihat dari proses matematik

$$\Delta V = V(r) - V(r_0) = - \int_{r_0}^r \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

adalah integral vektor (dot product $\vec{E} \cdot d\vec{l}$) maka kembalikan dari integral adalah diferensial diisi harus digunakan operator diferensial vektor yang dikenal dengan sebutan gradien.

$$E = -\nabla V$$

Operator gradien untuk koordinat kartesian dua dimensi (X-Y)

$$\nabla(x, y) = \hat{a}_x \frac{\partial}{\partial x} V(x, y) + \hat{a}_y \frac{\partial}{\partial y} V(x, y)$$

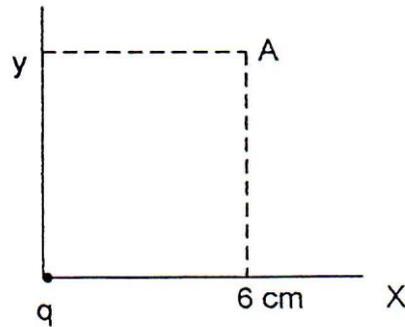
Sedang untuk koordinat polar dua dimensi

$$V(r, \varphi)$$

$$\begin{aligned} \nabla V(r, \varphi) &= \hat{a}_r \frac{\partial}{\partial r} V(r, \varphi) + \hat{a}_\varphi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} V(r, \varphi) \\ &= a_r E_r + a_\varphi E_\varphi \end{aligned}$$

Contoh-contoh:

1) Diberikan sumber muatan titik pusat koordinat sbb:



$$q = \frac{100}{9} \mu C$$

- Tentukan potensial listrik di titik B
- Jika di B disimpan muatan 10 m.c. Tentukan energi potensial
- Jika sebelum B muatan berada di A pada posisi(12;16)m tentukan energi yang diperlukan untuk memindahkan muatan dari A ke B; tentukan pula beda potensialnya.
- Carilah medan listrik di B dan gunakan dua metode yakni gradien dengan koordinat kartsian polar

Jawab:

$$a) V_B = k \frac{q}{r_B}$$

Seperti pada gambar

$$r_B = [X^2 + Y^2]^{\frac{1}{2}} = [6^2 + 8^2]^{\frac{1}{2}} = 10m$$

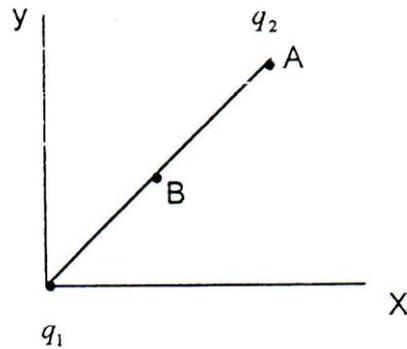
$$V_B = k \frac{q}{r_B} = 9 \times 10^9 \frac{\frac{100}{9} \times 10^{-6}}{10} = 10^4 \text{ volt}$$

$$b) U_B = V_{B,q} = 10^4 \times 10 \times 10^{-3} = 100 \text{ joule}$$

$$c) U_{AB} = - \int_{r_A}^{r_B} \vec{F} \circ d\vec{l}$$

$$r_B = 10m$$

$$r_A = [X_A^2 + Y_A^2]^{\frac{1}{2}} = [12^2 + 16^2]^{\frac{1}{2}} = 20m$$



Arah perpindahan yang paling sederhana yakni radial

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{a}_r$$

$$U_{AB} = - \int_{r_A}^{r_B} k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{a}_r \cdot \hat{a}_r dr$$

$$= k \frac{q_1 q_2}{r_B} - k \frac{q_1 q_2}{r_A}$$

$$= 9 \times 10^9 \frac{100 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^{-3}}{10} - 9 \times 10^9 \frac{100 \times 10^{-6} \times 10 \times 10^{-3}}{20}$$

$$= 100 - 50 = 50 \text{ joule}$$

$$\Delta U = \frac{\Delta U}{q} = \frac{50}{10 \times 10^{-3}} = 5000 \text{ volt atau}$$

$$\Delta U = - \int_{r_A}^{r_B} \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$\Delta V = V(B) - V(A) = - \int_{r_A}^{r_B} k \frac{q}{r^2} \hat{a}_r \cdot \hat{a}_r dr$$

$$= k \frac{q}{r} \Big|_{r_A}^{r_B} = k \frac{q}{r_B} - k \frac{q}{r_A}$$

$$\Delta V = 9 \times 10^9 \frac{100 \times 10^{-6}}{10} - 9 \times 10^9 \frac{100 \times 10^{-6}}{20}$$

$$= 10.000 - 5.000 = 5.000 \text{ joule}$$

$$d) \quad V = k \frac{q}{r}$$

$$E = -\nabla k \frac{q}{r}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$E = -\left(\hat{a}_x \frac{\partial}{\partial x} + \hat{a}_y \frac{\partial}{\partial y} \right) k \frac{q}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$E = -\left(-k \frac{q \hat{a}_x X}{\left[x^2 + y^2 \right]^{\frac{3}{2}}} - k \frac{q \hat{a}_y Y}{\left[x^2 + y^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right)$$

$$E = k \frac{q (\hat{a}_x X + \hat{a}_y Y)}{\left[x^2 + y^2 \right]^{\frac{3}{2}}}$$

dan $\hat{a}_r = \frac{\vec{r}}{r} = \frac{\hat{a}_x X + \hat{a}_y Y}{\sqrt{x^2 + y^2}}$

sehingga :

$$E = k \frac{q \vec{r}}{r^3} = k \frac{q}{r^2} \hat{a}_r$$

Jika menggunakan koordinat polar

$$E = -\nabla k \frac{q}{r}$$

$$\vec{E} = -\left(\hat{a}_r \frac{\partial}{\partial r} + \hat{a}_\phi \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} \right) \left(k \frac{q}{r} \right)$$

$$\vec{E} = -\left(-\hat{a}_r k \frac{q}{r^2} + 0 \right)$$

$$\vec{E} = \hat{a}_r k \frac{q}{r^2} = k \frac{q}{r^2} \hat{a}_r$$

LATIHAN SOAL

Carilah Energi Potensial dan potensiallistrik pada titik $q_1 = \frac{100}{9} \mu C(10;10;0)m$

yang diakibatkan oleh muatan lain

$q_2 = 10 \text{ mc}$ pada posisi $(0;10;0)m$

$q_3 = 20 \text{ mc}$ pada posisi $(10;0;0)m$

$q_4 = 30 \text{ mc}$ pada posisi $(10;10;10)m$

MODUL VIII

FISIKA LISTRIK MAGNET

KAPASITOR

Tujuan Instruksional Umum :

Setelah membaca pokok bahasan ini diharapkan dapat memahami prinsip dasar kapasitor.

Tujuan Instruksional Khusus :

1. Dapat mendefinisikan apa yang dimaksud dengan kapasitor
2. Dapat menjelaskan cara kerja kapasitor
3. Dapat menurunkan rumus kapasitansi
4. Dapat menghitung rangkaian kapasitor

Buku Rujukan Daftar Pustaka

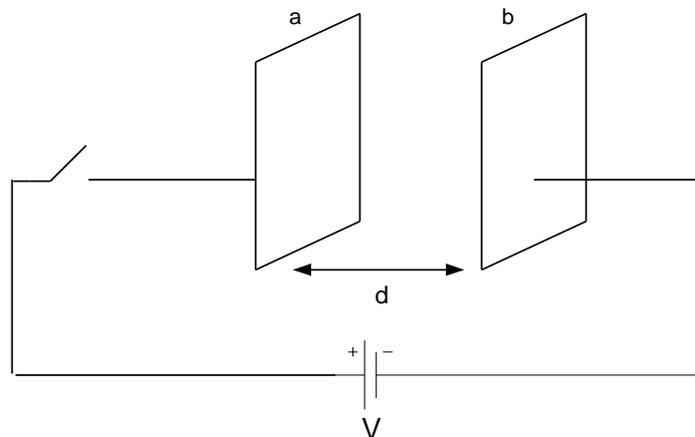
- | | |
|---------------------|--------------------|
| 1. Sear & Zemansky | University Physics |
| 2. Kane & Strenheim | Physics |
| 3. Sutrisno | ITB |
| 4. Johannes Surya | Olimpiade Fisika |

8.1. Pengertian Kapasitor dan Cara Kerjanya

Dalam banyak alat elektronika digunakan kapasitor pada pesawat radio penerima ; penguat ; filter dsbnya.

Kapasitor didefinisikan sebagai berikut :

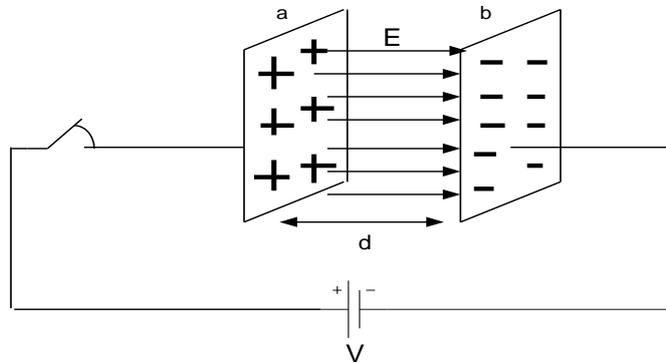
Adalah komponen pasif elektronika yang dapat menyimpan energi dalam bentuk medan listrik. Bagaimana alat yang namanya kapasitor dapat menyimpan energi, marilah kita tinjau lagi sistem plat sejajar seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 8.1 Plat sejajar

Plat (a) dan (b) adalah konduktor yang di dalamnya terdapat muatan-muatan bebas (positip dan negatip) dan dipisahkan oleh jarak d.

Jika saklar s ditutup maka plat (a) akan tersambung ke kutub positif sumber dan plat (b) tersambung ke kutub negatif. Sumber , dari sifat-sifat muatan listrik maka muatan negatip yang ada pada plat (a) akan ditarik oleh sumber sehingga plat (a) akan menjadi plat bermuatan positif sebaliknya pada plat (b) muatan-muatan positifnya akan ditarik oleh sumber sehingga plat (b) menjadi plat bermuatan negatif. Muatan pada plat akan mencapai harga maksimum sebesar Q setelah potensial mencapai harga V sama dengan potensial sumber (baterai). Setelah terjadi penyimpanan muatan pada plat maka diantara pasangan plat akan timbul medan listrik.



Gambar 8.2 Medan Listrik plat bermuatan

Setelah plat (a) dan (b) menyimpan muatan plat listrik dan saklar s dilepas maka akan tetap menyimpan muatan sebelum plat tersebut terhubung ke rangkaian lain. Peristiwa penyimpanan muatan ini menjadi dasar bekerjanya kapasitor.

8.2. Kapasitansi kapasitor plat

Seperti dijelaskan sebelumnya (pada model sebelum ini) kuat medan diantara plat sejajar ialah :

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

dimana $\sigma = Q / A$, yaitu kerapatan muatan atau muatan tiap satuan luas plat selanjutnya adalah beda potensial antara kedua plat adalah ;

$$V = E \cdot d \quad , \text{ sehingga}$$

$$V = \frac{\sigma}{\epsilon_0} d = \frac{Q}{\epsilon_0 A} d$$

$$Q = \epsilon_0 \frac{d}{A} V \quad \dots\dots\dots 8.1$$

yang dimaksud dengan kapasitansi adalah :

Kapasitas sistem untuk menyimpan muatan atau juga medan listrik

Kapasitansi diberi simbol C.

Jika dilihat dari persamaan 8.1 muatan yang terkumpul pada plat berbanding lurus dengan besar V (beda potensial) dan harga perbandingan antara muatan yang terkumpul terhadap beda potensial yang diberikan adalah harga kapasitansi.

Secara matematis dapat ditulis

$$C = \frac{Q}{V} \dots\dots\dots 8.2$$

untuk pasangan plat harga kapasitansi dapat dirumuskan berdasarkan pers 8.1 & 8.2

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 \frac{d}{A} Y}{V}$$
$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \dots\dots\dots 8.3$$

dimana C = kapasitansi (farad) atau Coulomb / Volt

ϵ_0 = permitivitas listrik udara

$$= 8,85 \times 10^{-12} \text{ (F / m)}$$

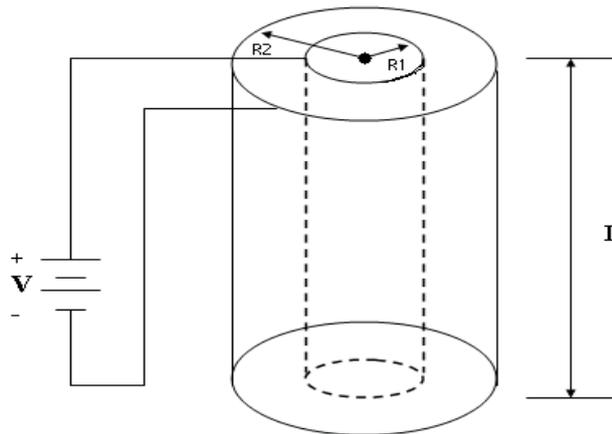
A = Luas plat (m^2)

d = jarak antara plat (m)

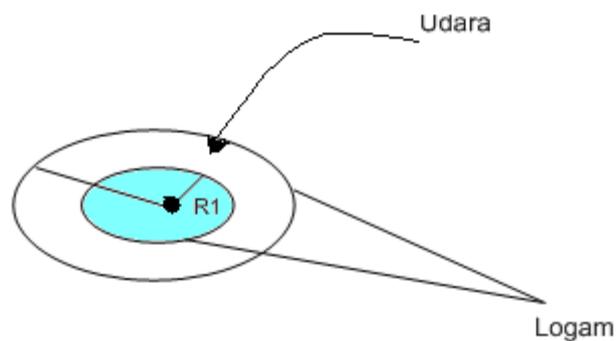
suatu sistem yang dapat menyimpan muatan listrik disebut sistem kapasiti. Sedangkan sistem kapasitif yang dibuat agar mempunyai harga kapasitif tertentu disebut kapasitor.

8.3 Kapasitas tabung silinder

Bentuk kapasitor yang sering digunakan dalam rangkaian listrik adalah pasangan plat seperti dijelaskan pada pasal 8.2 sedangkan bentuk yang lain adalah berbentuk tabung silinder seperti dapat ditunjukkan pada gambar dibawah ini



8.2 Dua silinder konsentrik bagian dalam pedal dan silinder luar tipis



8.3 Tampak atas

Untuk mengetahui kapasitansi dari kapasitor ini silinder bagian dalam diberi potensial V (kutub positif) dan kutub negatif disambungkan ke silinder luar. Setelah terkumpul muatan di kedua silinder akan terjadi medan listrik diantara kedua silinder sebesar

$$E(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \quad \text{untuk } R_1 < r < R_2$$

dan $E(r) = 0$, ditempat lain dimana λ adalah muatan tiap satuan panjang, beda potensial antara silinder luar dan dalam adalah :

$$V(R_1) - V(R_2) = - \int_{R_2}^{R_1} \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Arah E adalah arah radial silinder dan dl yang bergeser kearah radial adalah dr sehingga

$$V = V(R_1) - V(R_2) = - \int_{R_2}^{R_1} \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} dr$$

$$V = V(R_1) - V(R_2) = - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln r \Big|_{R_2}^{R_1}$$

$$V = V(R_1) - V(R_2) = - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} (\ln R_1 - \ln R_2)$$

$$V = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} (\ln R_2 - \ln R_1)$$

$$V = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$\lambda = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)}$$

Bila panjang silinder adalah L maka

$$Q = \lambda.L$$

$$\text{maka } Q = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} .L.V$$

$$\text{sedang kapasitansi } C = \frac{Q}{V}$$

maka kapasitansi dari pasangan tabung diatas menjadi

$$C = \frac{\frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right)} .L.V}{V} \quad \boxed{C = \frac{2\pi\epsilon.L}{\ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)}} \dots\dots\dots 8.4$$

keterangannya

R_2 = jari-jari silinder luar (m)

R_1 = jari-jari silinder dalam (m)

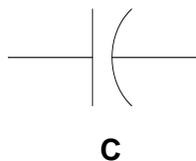
L = panjang silinder

ϵ_0 = permitivitas listrik udara (mks)

C = kapasitansi (F)

8.4 Rangkaian kapasitor

Sering kali kita perlu menggabungkan beberapa kapasitor, kita dapat melakukan ini dengan berbagai cara. Cara dasar menggabungkan kapasitor ini adalah hubungan seri dan paralel. Sebelum menggabungkan kapasitor dikenalkan simbol dari kapasitor sebagai berikut :

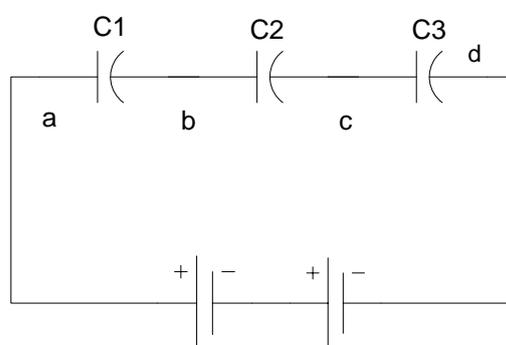


Gambar 8. simbol kapasitor

Rangkaian seri kapasitor

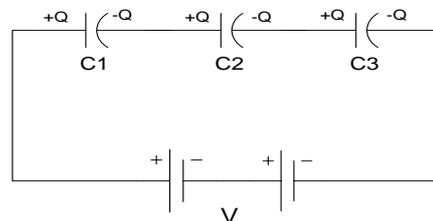
Istilah seri pada rangkaian dimaksudkan apabila dialiri oleh muatan yang sama (arus yang sama) dan tegangan (beda potensialnya) terbagi pada komponen yang diserikan.

Rangkaian seri kapasitor dapat digambarkan sebagai berikut



Gambar 8.5 Rangkaian seri kapasitor

kapasitansi gabungan seri diberi nama kapasitansi (C ekivalen) akibat kapasitor dirangkai seri maka pada kapasitor akan terjadi pengumpulan muatan yang sama besar sebagai berikut



8.6 Muatan kapasitor seri

Ketika dihubungkan ke sumber V keping kiri C1 akan menjadi keping bermuatan positif dan menarik elektron yang di keping kiri C2 dan menempati keping kanan C1 sehingga keping kanan C1 bermuatan negatif dan keping kiri C2 positif demikian seterusnya, akibatnya

$$V = V_{ad} + V_{ab} + V_{bc} + V_{cd}$$

Akan tetapi $V_{ab} = \frac{Q}{C_1}; V_{bc} = \frac{Q}{C_2}; V_{cd} = \frac{Q}{C_3}$

sehingga $V = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$

karena C ekivalen = Q / V atau V = Q / C ekivalen

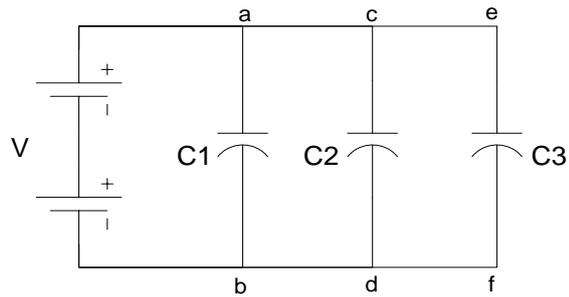
maka $\frac{1}{C_{ekivalen}} = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$

$$\frac{1}{C_{ekivalen}} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

8.5

Rangkaian paralel kapasitor

Suatu rangkaian dikatakan paralel apabila mendapat beda potensial yang sama dan muatannya terbagi untuk tiga buah kapasitor, digambarkan sebagai berikut



Gambar 8.7 Rangkaian paralel kapasitor

pada rangkaian diatas

$$V = V_{ab} + V_{cd} + V_{ef}$$

$$\text{dan } Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

dimana

$$Q_1 = \text{muatan pada kapasitor 1}$$

$$Q_2 = \text{muatan pada kapasitor 2}$$

$$Q_3 = \text{muatan pada kapasitor 3}$$

$$\text{sedang } Q_1 = C_1 V_{ab}$$

$$Q_2 = C_2 V_{cd}$$

$$Q_3 = C_3 V_{cd}$$

$$\text{Sehingga } Q = C_1 V_{ab} + C_2 V_{cd} + C_3 V_{cd}$$

$$Q = C_1 V + C_2 V + C_3 V$$

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

$$\text{Dan } C_{\text{ekivalen}} = Q / V$$

$$\text{maka } C_{\text{ekivalen}} = \frac{V(C_1 + C_2 + C_3)}{V}$$

$C_{\text{ekivalen}} = C_1 + C_2 + C_3$8.6
---	----------

Contoh:

1. Tentukan kapasitansi dari pasangan plat konduktor yang dipisahkan oleh jarak 10 cm dengan luas keping 1 m² dengan medium udara

Jawab :

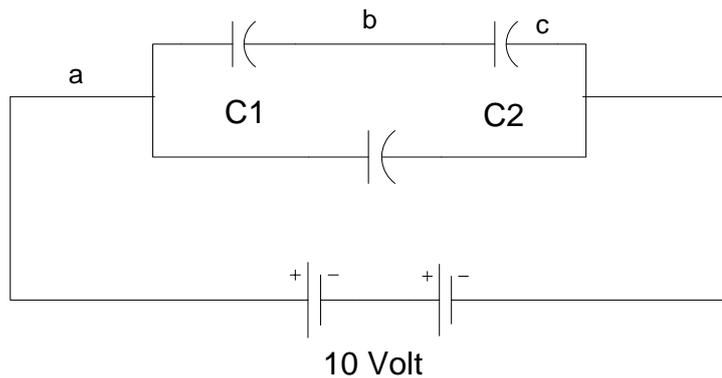
$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} = \frac{8,85 \times 10^{-10}}{0,1} = 88,5 \times 10^{-12} F$$
$$= 88,5 \text{ Pf}$$

2. Kapasitor tabung dengan panjang 0,5 m , jari-jari bagian dalam 1 cm dan jari-jari bagian luar 2,71828 cm, medium antara tabung udara tentukan kapasitansinya

Jawab :

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = \frac{2\pi\left(\frac{1}{36\pi} \times 10^9\right) \cdot 0,5}{\ln 2,71828}$$
$$C = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} F$$

3. Perhatikan rangkaian kapasitor sebagai berikut



$$C1 = 10 \mu F$$

$$C2 = 20 \mu F$$

$$C3 = 13,3 \mu F$$

- a. Hitung muatan yang tersimpan di C1, C2, dan C3
- b. Kapasitansi ekivalen
- c. Tentukan tegangan pada masing-masing kapasitor

Jawab

- a. Pada C1 dan C2 dihubungkan seri maka $Q_1 = Q_2$ dan pada C3 terdapat muatan Q_3

$$\text{Muatan total } Q = Q_1 + Q_3$$

$$\text{Beda potensial pada C3} = V_{ac} = 10 \text{ Volt}$$

$$Q_3 = C_3 V_{ab} = 13.3 \cdot 10^{-6} \times 10 = 1.33 \times 10^{-4}$$

Muatan total dapat dihitung dari kapasitansi ekivalen

$$C \text{ ekivalen} = C_1 \text{ seri } C_2 // C_3$$

$$\begin{aligned} C \text{ ekivalen} &= \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + C_3 \\ &= \frac{10 \cdot 20}{30} 10^{-6} + 13.3 = 20 \times 10^{-6} F = 20 \mu F \end{aligned}$$

- b. Muatan total $Q = C \text{ ekivalen} \cdot V_{ac} = (20 \times 10^{-6}) \cdot 10 = 20 \times 10^{-4} \text{ Coulomb}$

$$Q_1 = Q_2 = Q - Q_3 = 2 \times 10^{-4} - 1.3 \times 10^{-4} = 0.67 \times 10^{-4} \text{ Coulomb}$$

$$V \text{ di C3} = V_{ab}$$

- c. $V_{ac} = V$ sumber 10 Volt

Tegangan di C1

$$V_{ab} = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{0.67 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-6}} = 6.7 \text{ volt}$$

$$V_{bc} = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q_1}{C_2} = \frac{0.67 \times 10^{-4}}{20 \times 10^{-6}} = 3.3 \text{ Volt}$$

$$V = V_{ab} + V_{bc} = 6.7 + 3.3 = 10 \text{ Volt}$$

Dari penyelesaian diatas C ekivalen telah dihitung

$$C \text{ ekivalen} = 20 \mu F$$

MODUL IX

LISTRIK MAGNET

DIELEKTRIK & PERPINDAHAN LISTRIK D

Tujuan intruksional Umum :

Setelah menyelesaikan pokok bahasan ini diharapkan mahasiswa dapat menganalisa pengaruh dielektrik terhadap medan listrik

Tujuan intruksional Khusus :

- Dapat menjelaskan perubahan medan listrik akibat medium dielektrik
- Dapat menghitung kapasitor dielektrik
- Dapat menjelaskan terjadinya polarisasi pada medium
- Dapat menjelaskan perpindahan listrik D pada medium dielektrik

Buku Rujukan :

- | | |
|------------------|---------------------------------|
| ▪ Kane Sternheim | Physics 3 rd Edition |
| ▪ Sears Zemansky | University Physics |
| ▪ Sutrisno | Fisika Dasar IV ITB |
| ▪ Johannes Surya | Olimpiade Fisika |

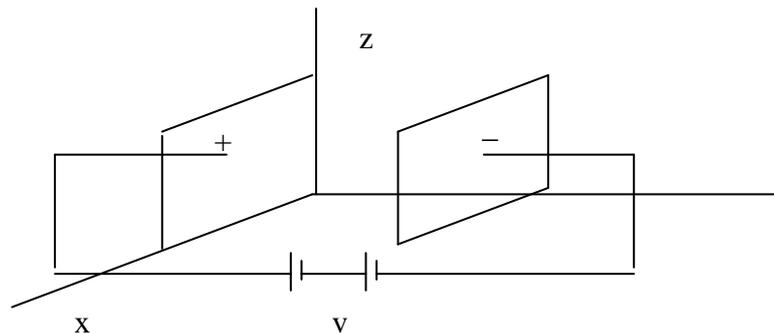
9.1 Dielektrik

Dalam ini terdapat bahan yang mempunyai sifat menghantar listrik yang terbaik (Konduktor), bahan yang tidak menghantar listrik (Penyekat – Isolator) dan bahan diantara kedua bahan tersebut, (Semikonduktor) sifat – sifat daya hantar listrik bahan ditentukan oleh muatan – muatan yang terdapat dalam bahan tersebut jika muatan tersebut mudah berpindah tatkala dipengaruhi medan listrik maka bahan tersebut dikatakan penghantar listrik sebaliknya jika muatan – muatan terikat pada atom – atomnya maka bahan itu disebut isolator. Dalam bahan isolator sempurna, tidak ada muatan – muatan bebas. Semua electron terikat pada masing – masing atom. Bila bahan isolator ditaruh dalam medan listrik, dalam bahan akan terbentuk dipol listrik, sehingga pada permukaan bahan akan terjadi muatan induksi. Bahan isolator juga disebut Dielektrik. Terutama bila kita membicarakan dari segi muatan induksi yang ditimbulkan di dalam medan listrik.

Bila kita memahami sifat dielektrik, akan mudahlah kita memahami pula sifat bahan magnetic, karena ada analogi yang sangat dekat dalam pengertian kedua bahan ini.

9.1.1 Permittivitas

Pada ruang diantara dua plat yang dihubungkan ke beda potensial listrik terdapat medan listrik sebagai berikut

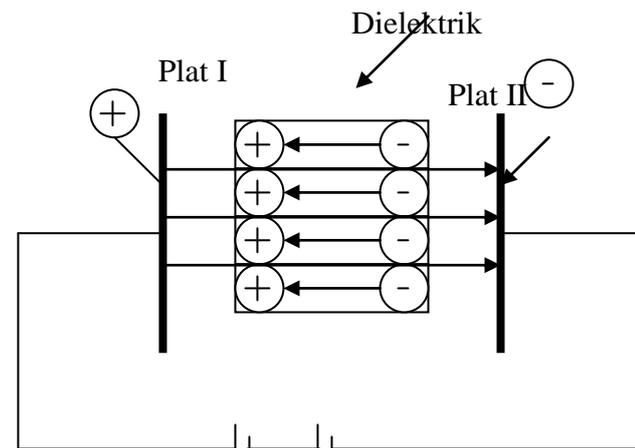


Gambar 9.1 Dua plat konduktor berpasangan

$$E = a_y \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

$$\text{Dan } E = \frac{V}{d} a_y$$

Misalkan diantara plat tersebut disimpan bahan dielektrik maka akan timbul muatan induksi pada permukaan dielektrik , akibatnya terjadi pelemahan medan listrik diantara kedua plat konduktor tersebut dibandingkan sebelum disimpan dielektrik untuk lebih jelasnya dapat digambarkan sebagai berikut



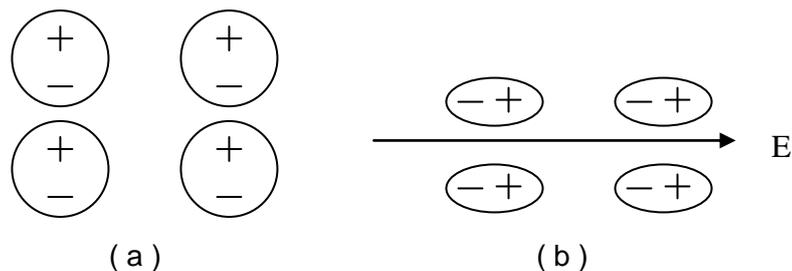
Gambar 9.2 plat sejajar berisi bahan dielektrik

$$E = E_0 + E_i$$

E_i = Medan listrik akibat induksi

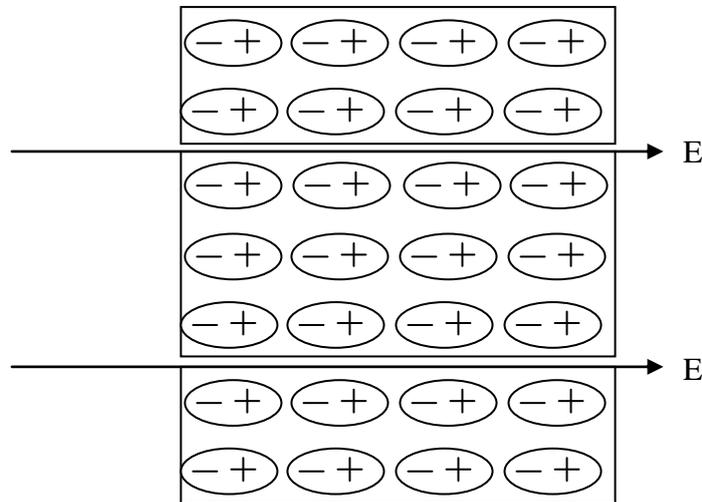
E_0 = Medan listrik sebelum terdapat dielektrik

Timbulnya muatan induksi dapat diterangkan sebagai berikut. Misalkan kita mempunyai sekumpulan molekul yang muatannya positif dan negatif. Pada tiap molekulnya terpusat pada tempat yang sama. Molekul seperti ini dikatakan bersifat nonpolar. Bila ditaruh dalam medan listrik , gaya coulomb akan merengangkan pusat muatan positif dan negatif.



- Gambar 9.3 a. Molekul non polar pusat muatan positif dan negatif
 b. Molekul non polar pada medan listrik terjadi polarisasi (arah positif dan negatif sudah terarah)

Pada bahan yang mempunyai sifat polar kutub positif dan negatifnya tidak paeda satu titik. Dalam bahan yang bersifat polar , arah momen dipol adalah acak dan bila disimpan dalam medan listrik akan terjadi polarisasi seperti terjadi pada muatan non polar sehingga molekul akan terarah. Bahan dielektrik setelah dipengaruhi medan listrik akan terlihat seperti pada gambar di bawah ini



Gambar 9.4 Timbulnya momen dipol induksi dalam bahan dielektrik
 Medan listrik luar misalkan ke kanan (sb y)

$$E = a_y \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

Dan akibat terjadi polarisasi maka pada permukaan sebelah kiri seolah – olah terjadi kumpulan muatan negatif dan permukaan sebelah kanan terjadi muatan positif peristiwa sering disebut induksi , jika kerapatan muatan induksi adalah sebesar σ_i maka medan listrik akibat induksi adalah sebesar

$$E_i = -a_y \frac{\sigma_i}{\epsilon_0}$$

Arah dari medan akibat induksi berlawanan dengan sumber medan luar sehingga total akan lebih kecil dari medan sebelum diberi dielektrik

$$E = E_0 + E_i$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} a_y - \frac{\sigma_i}{\epsilon_0} a_y$$

$$E = ay \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0} - \frac{\sigma_i}{\epsilon_0} \right)$$

Ket :

ay = menunjukkan arah sumbu y

E_0 = medan listrik sebelum diberi dielektrik

E_i = medan listrik akibat induksi

E = medan listrik total

Rapat muatan induksi σ_i bergantung pada kuat medan listrik di dalam dielektrik tersebut

$$\sigma_i = X_e E$$

X_e = tetapan disebut suseptibilitas listrik sehingga

$$E = \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0} - \frac{X_e E}{\epsilon_0} \right)$$

$$E \left[1 + \frac{X_e}{\epsilon_0} \right] = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \left[1 + \frac{X_e}{\epsilon_0} \right]}$$

Harga $1 + \frac{X_e}{\epsilon_0}$ disebut tetapan dielektrik

$$K_e = 1 + \frac{X_e}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{Ke\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Dimana $\epsilon = K_e \cdot \epsilon_0$

$\epsilon =$ permitivitas medium

$\epsilon_0 =$ permitivitas udara / hampa

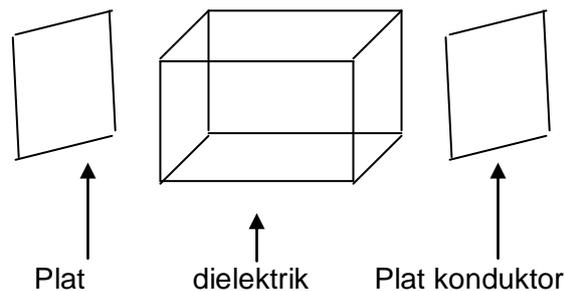
$\sigma =$ kerapatan muatan

$E =$ medan listrik

9.1.2 Kapasitor dielektrik :

Dengan adanya dielektrik sebagai medium pada kapasitor maka harga kapasitansi akan mengalami perubahan

9.1.2.1 Kapasitor Plat



Gambar 9.5 Kapasitor plat bermedium dielektrik

Kapasitansi dari kapasitor plat adalah

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

Dengan $Q = \sigma \cdot S$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma}{Ke \epsilon_0}$$

Atau

$$\sigma = Ke \epsilon_0 E$$

sedang $V = E \cdot d$

$$V = \frac{\sigma}{k_e \epsilon_0} \cdot d$$

Maka

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\sigma S}{\frac{\sigma}{k_e \epsilon_0} \cdot d}$$

$$C = \frac{k_e \epsilon_0 S}{d} \quad \text{atau} \quad C = C_0 k_e$$

C = kapasitansi dalam farad

D = jarak antara plat (m)

ϵ_0 = permitivitas udara

k_e = konstanta dielektrik

S = luas penampang dalam m^2

C_0 = kapasitor tanpa dielektrik (farad)

9.1.2.2 Kapasitor tabung

Dengan mengambil analogi kapasitor plat kapasitor tabung dapat diturunkan dan hasilnya

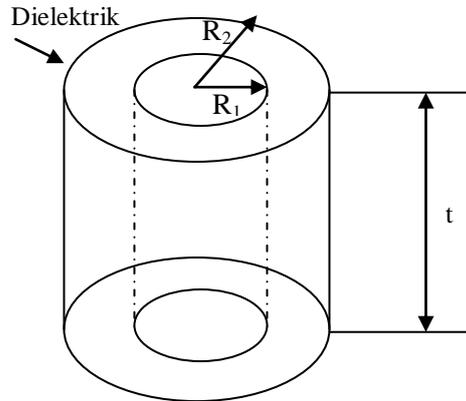
$$C = \frac{2\pi k_e t}{\ln \left[\frac{R_2}{R_1} \right]}$$

Ket :

t : tinggi (m)

R2 : jari – jari luar (m)

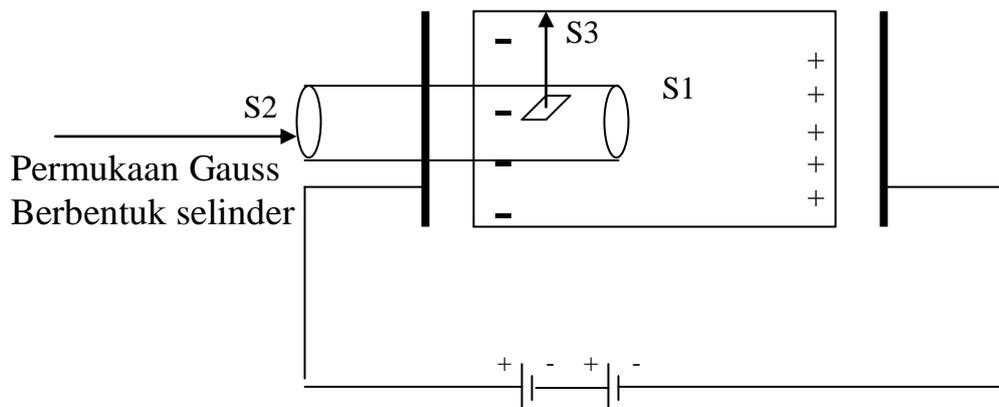
R1 : jari – jari dalam (m)



Gambar 9.6 kapasitor tabung dengan medium dielektrik

Perpindahan listrik D

Bayangkan kapasitor plat sejajar berisi dielektrik dan kemudian kita tinjau dari segi Hk Gauss perhatikan gambar 9.7 sbb



Gambar 9.7 Kapasitor dielektrik bermuatan

Ambil sisi sebelah kiri untuk dianalisa secara HK Gauss

$$\oiint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = q_{\text{enclose}}$$

q_{enclose} adalah muatan bebas dan

$$\oiint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{\sum q}{\epsilon_0}$$

$$\oiint E \cdot ds = \frac{q - q_i}{\epsilon_0}$$

Σq adalah jumlah total muatan yakni gabungan bebas dan muatan induksi

$$q_i = \iint \sigma_i \cdot ds$$

$q_i = \iint X_e E \cdot ds$ dari gambar terlihat muatan di luar plat adalah nol sehingga dengan q muatan bebas dengan demikian analog dengan HK Gauss

$$\oiint D \cdot ds = q \quad \text{atau} \quad E \left(1 + \frac{X_e}{\epsilon_0} \right) \epsilon_0 = D$$

X_e

dimana $\epsilon \left(1 + \frac{X_e}{\epsilon_0} \right) = k_e \cdot \epsilon_0 = \epsilon$

$E k_e \epsilon_0 = D$

sehingga

$$E = \frac{D}{k_e \epsilon_0}$$

Walaupun persamaan di atas diturunkan dari keadaan muatan plat sejajar ternyata hubungan di atas berlaku umum.

Contoh :

Sebuah plat sejajar berisi dielektrik dengan tetapan dielektrik $k_e = 5000$ jarak antara plat adalah 10^{-3} mm dan luas plat 10 cm

Kapasitor dihubungkan dengan beda potensial 20 V. marilah kita hitung

- a. Kapasitansi
- b. Kuat medan dielektrik
- c. Perpindahan
- d. Momen dipol total dielektrik

$$\frac{1}{4\pi \epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ mks}$$

jawab :

a. Kapasitansi

$$C = \epsilon \frac{A}{d} = k_e \epsilon_0$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{(4\pi)(9 \times 10^9)} = \frac{10^{-9}}{4\pi 9}$$

$$A = 0 \text{ cm}^2 = (10)(10^{-4}) \text{ m}^2, d = 10^{-3} \text{ mm} = 10^{-6} \text{ m}$$

$$C = \frac{5000 \cdot 10^{-9}}{(4\pi)(9)} \frac{10^{-3}}{10^{-6}} \times 10^6 \mu F$$

$$= \frac{5000}{4\pi \cdot 9} \mu F = 44,2 \mu F$$

b. Kuat medan dalam dielektrik

$$E = \frac{V}{d} = \frac{20 \text{ V}}{10^{-6}} = 2 \times 10^7 \text{ V m}^{-1}$$

Ini adalah medan yang sangat kuat . Pada harga $E = 10^6 \text{ Vm}^{-1}$ udara sudah mengalami ionisasi , dan terjadi loncatan listrik bila dielektrik tidak kuat menahan kuat medan di dalamnya, arus listrik mengalir dalam kapasitor, dan kapasitor dikatakan jebol

c. (1) perpindahan D dapat dihitung dari

$$D = \epsilon E = k_e \epsilon_0 E$$

$$= (5000) \left(\frac{1}{4\pi} \right) \left(\frac{1}{9} \right) \times (10^{-9}) (2) (10^7)$$

$$= \frac{100}{(4\pi)(9)} = 0,89 \text{ Cm}^{-2}$$

c(2). Kita dapat menghitung D dari

σ

σ

$E = \frac{D}{\epsilon}$ untuk plat sejajar, sehingga $D = \epsilon E = \epsilon \sigma = \sigma$, yaitu rapat muatan bebas.

Rapat muatan $\sigma = \frac{Q}{A}$, sedang $Q = CV = (44,3)(10^{-6})(20)C = 0,89 \times 10^{-3} \text{ C}$

Rapat muatan $\sigma = \frac{Q}{A} = \frac{0,89 \times 10^{-3}}{10^{-3}} = 0,89 \text{ Cm}^{-2}$

Sehingga untuk plat sejajar $D = \sigma = 0,89 \text{ Cm}^{-2}$

MODUL X
FISIKA LISTRIK MAGNET
ARUS LISTRIK

Tujuan Instruksional Umum

Setelah menyelesaikan pokok bahasan ini mahasiswa dapat menganalisa terjadinya arus listrik pada logam.

Tujuan Instruksional Khusus

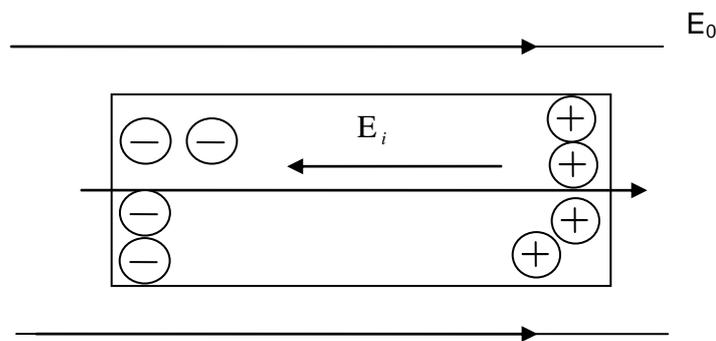
- Dapat menjelaskan terjadinya arus listrik pada logam.
- Dapat menurunkan hukum Ohm.
- Dapat mempergunakan hukum Ohm untuk arus yang serba sama dan arus yang tidak sama.

Buku Rujukan

- Kane Sternheim Physics 3rd Edition
- Sears zemansky University Physics
- Sutrisno Fisika Dasar IV ITB
- Johanes Surya Olimpiade Fisika

10.1 GGL (Gaya Gerak Listrik)

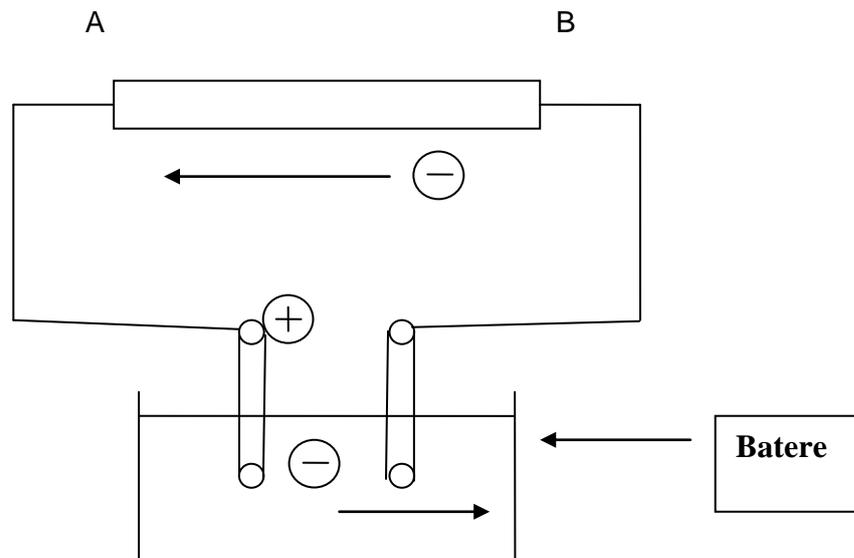
Pada logam (konduktor), arus listrik terdiri dari aliran elektron bebas yang bermuatan negatif. Dalam logam ion positif tak mengalir karena terikat dalam jaringan atom bahan. Jika sebatang logam konduktor panjang disimpan didalam medan listrik seperti gambar 10.1



Gambar 10 . 1

Sejara setelah logam mendapat medan listrik, electron bebas mendapat gaya medan listrik (gaya Coulomb) dan bergerak menuju ujung kiri, ujung kanan menjadi positif karena ditinggalkan elektron. Selanjutnya didalam logam akan timbul medan listrik induksi E_i . Makin banyak muatan induksi pada ujung logam, makin besar pula kuat kuat induksi E_i . Akhirnya harga kuat medan induksi sama dengan kuat medan E_0 dan dalam logam kuat medan total menjado nol,dalam hal ini potensial listrik kedua ujungnya sama besar. Pada keadaan ini aliran elektron akan terhenti dan pada kedua ujung logam terjadi muatan induksi.

Bagaimanakah caranya agar aliran *elektron* bebas berjalan terus? Ini dapat diperoleh bila muatan induksi terus diambil, sehingga dalam logam tidak timbul medan listrik induksi. Alat yang dapat menghasilkan aliran elektron bebas atau arus listrik terus bertahan adalah sumber gaya gerak listrik. (electron motive force, emf) adalah kemampuan untuk membuat agar kedua ujung logam harganya tetap, agar terjadi elektron mengalir terus diputar dalam rangkaian sehingga tak sempat membentuk muatan induksi pada kedua ujung logam.



Gambar 10.2 Batang logam AB dihubungkan dengan kutub-kutub batere agar terjadi aliran listrik

Batang logam AB kita hubungkan dengan kedua kawat pada dua kutub suatu sumber gaya gerak listrik, misalnya batere mobil (accu) beda potensial antara ujung A dan B adalah tetap walaupun kutub positif terus diberi muatan negative. Untuk menggerakkan muatan terus menerus energi. Dalam sumber ggl terjadi perubahan atau konversi energi dari satu bentuk menjadi energi listrik.

Misalnya :

- Pada batere terjadi konversi energi dari energi kimia menjadi energi listrik
- Pada PLTA terjadi konversi energi potensial air menjadi energi listrik
- Dst.

Gaya gerak listrik adalah beda potensial antara kedua kutub sumber ggl bila tidak ada arus mengalir dan nyatakan sebagai tegangan ϵ Istilah ggl sebetulnya kurang tepat sebab yang di maksud adalah beda potensial, jadi bahan gaya mungkin lebih tepat adalah potensial penggerak listrik.

10.2 Arus listrik dalam logam

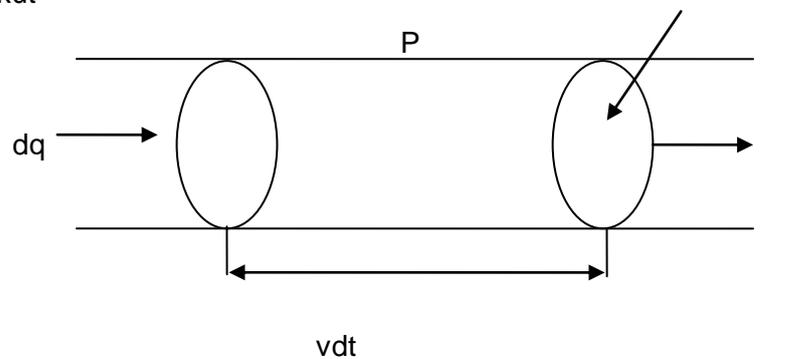
Arus listrik didefinisikan sebagai banyaknya muatan listrik yang mengalir setiap satuan waktu.

$$I = \frac{dq}{dt}$$

I = arus listrik dihitung dalam satuan ampere atau coulomb/detik

Sedangkan $\frac{dq}{dt}$ adalah laju muatan persatuan waktu (perubahan muatan setiap satuan waktu)

Marilah kita perhatikan aliran muatan yang mengalir pada logam sebagai berikut



Gambar 10.2 Arus dalam kawat logam membawa muatan dengan melalui titik P dalam waktu dt , laju gerak pembawa muatan adalah v dan luas penampang A .

Jika muatan persatuan volume = n dan setiap muatan partikel bermuatan = e maka rapat muatan bebas adalah $\rho = ne$. Jika laju gerak rata-rata muatan pembawa adalah v m/s luas penampang A m² pada waktu dt muatan telah berpindah membentuk volume sebelum sbb

$$\text{Vol} = Avdt$$

$$\begin{aligned} \text{Dan } dQ &= \rho \text{Vol} \\ &= ne \cdot Avdt \end{aligned}$$

$$\text{maka } I = \frac{dQ}{dt} = \frac{eAvdt}{dt} = neAv$$

$$\text{kita definisikan rapat arus } J = \frac{i}{A} = \frac{neAv}{A}$$

$$J = nev \dots \dots \dots \text{Ampere/m}^2$$

Jadi rapat arus sebanding dengan laju rata-rata pembawa muatan v .

10.3 Hukum Ohm

Arus yang mengalir pada penghantar jika diberi potensial tetap pada umumnya adalah tetap. Jika kita memandangnya hanya dari Hk Newton II, muatan-muatan listrik pada logam yang berbeda pada medan listrik akan mendapat gaya Coulomb $F = q E$ dan gaya tersebut akan menimbulkan percepatan pada muatan sehingga kecepatan aliran muatan akan bertambah dan mengakibatkan naiknya arus listrik tetapi kenyataannya tidak demikian hal ini terjadi gaya yang ada pada muatan-muatan tersebut bukan hanya gaya Coulomb ada gaya lain yaitu gaya gesekan.

Pada waktu bergerak didalam logam pembawa muatan tidak bergerak pada garis lurus, tetapi selalu bertumbukan dengan atom logam dalam tumbukan tersebut terjadi perpindahan energi makin cepat gerakan muatan makin sering terjadi tumbukan. Akibat tumbukan tersebut, pembawa muatan bergerak dengan kecepatan rata-rata tetap dan logam menjadi panas.

Kecepatan rata-rata akhir pembawa muatan haruslah konstan sebanding dengan kuat medan listrik E .

Dan dikenal dengan Hk Ohm sbb

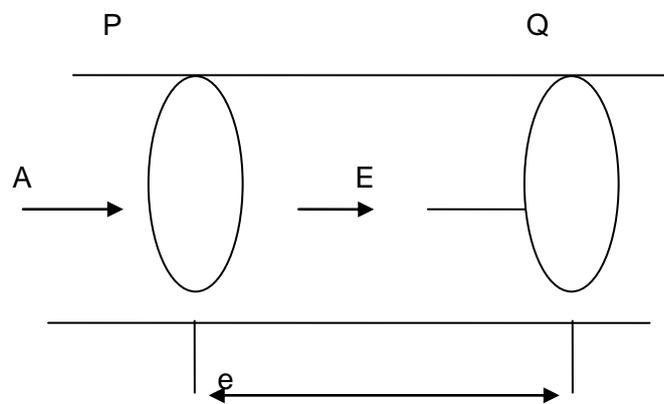
$$\mathbf{J = \sigma E}$$

J = rapat arus (A/m²)

σ = konduktivitas bahan $\left(\frac{\text{Ampere}}{\text{Voltmeter}} \right)$

E = kuat medan listrik

Logam berpenampang serba sama



Gambar 10.3

Misal beda potensial di antara P dan Q

$$V_{(P)} - V_{(Q)} = V$$

Maka kuat medan listrik antara P dan Q

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

Menurut Hk Ohm

$$J = \sigma E$$

$$J = \sigma \frac{V}{e}$$

Dimana J adalah rapat arus yakni

$$J = I/A \text{ atau } I = JA$$

Sehingga

$$i = JA = \sigma \frac{V}{\ell} A$$

$$\boxed{i = JA = \sigma \frac{A}{\ell} V} \longrightarrow \boxed{V = \frac{1}{\sigma} \frac{\ell}{A} i}$$

Besaran $\frac{1}{\sigma} \frac{\ell}{A}$ adalah konstanta dan harganya ditentukan oleh sifat konduktivitas bahan σ , panjang penghantar ℓ dan arus penampang penghantar A .

$\frac{1}{\sigma}$ sering dinamakan resistivitas ρ atau

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

Konstanta penghantar tersebut sering diberi nama Resistansi penghantar (R) sehingga

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{\ell}{A}$$

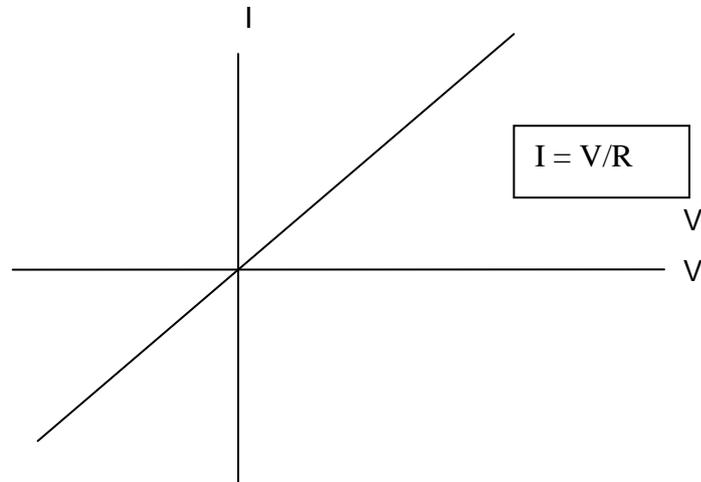
$$\text{Atau } R = \rho \frac{\ell}{A}$$

R diberi satuan Ohm (Ω)

Untuk kondisi sederhana seperti diatas hukum ohm dapat ditulis

$$\mathbf{V = IR}$$

Grafik bahan yang bersifat ohmik dapat digambarkan sbb



Gambar 10.4 grafik I Vs V pada bahan yang bersifat ohmik

Pada bahan konduktor sifat resistansi dipengaruhi oleh temperature dengan koefisien temperatur positif hal ini terjadi karena getaran atom dalam logam dan tumbukan yang dialami bahan makin banyak pada bahan semi konduktor sifat resistansi mempunyai koefisien temperatur negatif, makin tinggi temperatur makin rendah harga hambatan listriknya, hal ini terjadi karena penambahan jumlah elektron bebas dengan naiknya temperature mempunyai pengaruh yang lebih kuat dari pada getaran atom.

Untuk distribusi arus yang tak serba sama hambatannya adalah :

$$R = \frac{V}{\int J \cdot ds} = \frac{V}{\int \sigma E \cdot ds}$$

Jika yang diberikan medan listrik antara kedua ujung penghantar maka resistansi berlaku

$$R = \frac{\int E \cdot d\ell}{\int \sigma E \cdot ds}$$

MODUL XI
FISIKA LISTRIK MAGNET
HUKUM KIRCHOFF DAN RANGKAIAN SEDERHANA

Tujuan instruksional umum:

Setelah membahas pokokbahasan ini dapat memahami hukum kirchoff dan penggunaannya.

Tujuan instruksional khusus:

- Dapat menghitung arus dan tegangan pada rangkaian sederhana.
- Dapat menggunakan metoda dalam perhitungan arus dan tegangan pada rangkaian sederhana.

Buku rujukan :

- | | |
|----------------------|--------------------|
| ▪ Giancoli | Physics |
| ▪ kane & Sterheim | Physics 3 Edition |
| ▪ Sears & Zemanky | University Phisics |
| ▪ Frederick J Bueche | Seri Buku Schaum |
| ▪ Sutrisno | Seri Fisika Dasar |
| ▪ Johanes Surya | Olimpiade Fisika |

11.1 Hukum kirchoff

Hukum kirchoff yang di gunakan dalam perhitungan rangkaian listrik terdapat dua macam yakni:

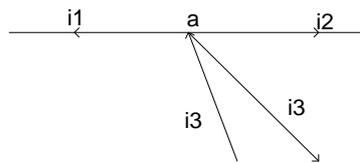
1. Hukum kirchoff tentang arus (KCL)
2. Hukum kirchoff tentang tegangan (KVL)

Untuk hukum kirchoff tentang arus listrik dan tegangan yang perlu diperhatikan adalah Node (titik). Branch (cabang) dan loop (rangkaian tertutup).

Hukum kirchoff tentang arus menyatakan bahwa

“Pada suatu node (titik) jumlah arus yang masuk sama dengan jumlah arus yang keluar” atau $\sum i = 0$ dengan memperhatikan arus masuk yang diberi notasi positif dan arus keluar diberi notasi negatif.

Contoh:



gambar 11.1

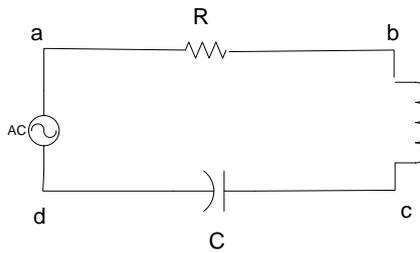
Pada titik a $\sum i = 0$

$$i1 + i2 - i3 + i4 = 0$$

$$\text{atau } i1 + i2 + i4 = i3$$

sedang hukum kirchoff tentang tegangan listrik menyatakan bahwa: “pada suatu rangkaian tertutup (loop) jumlah tegangan sama dengan nol” atau

$$\sum v = 0.$$



Gambar 11.2

Untuk loop abcd jumlah tegangan sama dengan nol.

$$\sum v = 0$$

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{cd} - V_{da} = 0$$

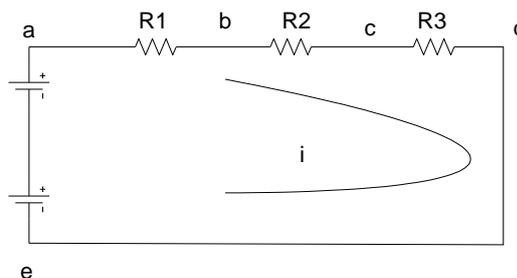
$$iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt - V_s = 0$$

11.2. Penerapan hukum kirchoff pada rangkaian seri dan paralel resistor.

11.2.1 Rangkaian seri resistor

pengertian rangkaian seri dan rangkaian yang setiap komponennya mendapat arus yang sama dan tegangan terbagi di setiap komponen yang diserikan tergantung pada komponen tersebut.

Pada rangkaian seri resistor sebagai berikut



Gambar 11.3

R1, R2 dan R3 dipasang sebagai rangkaian seri. Masing-masing R1, R2 dan R3 mendapat arus yang sama dengan tegangan sumber V terbagi disetiap komponen.

$$V = V_{ab} + V_{bc} + V_{cd}$$

$$V = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

$$V = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

Sehingga tahanan pengganti dari gabungan R_1, R_2 dan R_3 adalah

$$R_{\text{pengganti}} = \frac{V}{I} = \frac{I(R_1 + R_2 + R_3)}{I}$$

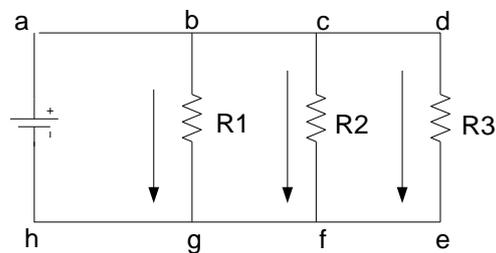
$$R_{\text{pengganti}} = (R_1 + R_2 + R_3)$$

Untuk rangkaian resistor (tahanan) yang dipasang seri maka gabungan adalah dengan jalan menjumlahkan seluruh resistor yang diseri kan. Penyelesaian persamaan diatas terlihat sebagai penerapan Hukum kirchoff untuk rangkaian tertutup.

11.1.2. Rangkaian paralel resistor

Pengertian rangkaian paralel adalah suatu rangkaian yang setiap komponen yang dipararelkan mendapat tegangan yang sama sedang arus sumber terbagi pada setiap komponen yang dipararelkan.

Pada rangkaian resistor yang dipararelkan sebagai berikut



Gambar 11.4

Dari hukum kirchoff tentang arus pada titik b

$$\sum i = 0$$

$$i_1 + i_2 - i_3 + i_4 = 0$$

$$i_1 + i_2 + i_4 = i_3$$

sedang konsep paralel menyatakan bahwa

$$V_{ah} = V_{bg} = V_{cf} = V_{de} = V$$

Dan menurut hukum ohm

$$i = \frac{V_{bg}}{R_1} = \frac{V}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{V_{cf}}{R_2} = \frac{V}{R_2}$$

$$i_3 = \frac{V_{de}}{R_3} = \frac{V}{R_3}$$

$$i = \frac{V}{R_{penganti}} = \frac{V}{R_p}$$

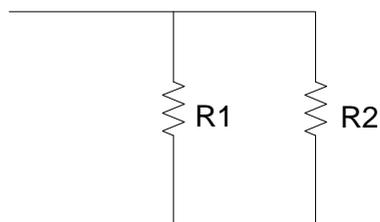
Dari persamaan (1) dan (2) didapat:

$$\frac{V}{R_p} = \frac{V}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

atau

$$\boxed{\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

untuk dua buah resistor yang diparaelkan dapat disederhanakan



Gambar 11.5

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

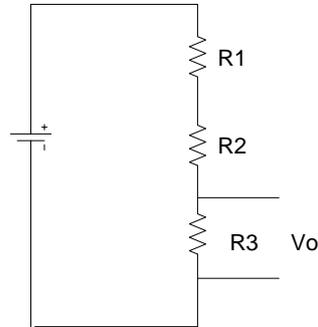
$$= \frac{R_2}{R_1 R_2} + \frac{R_1}{R_1 R_2}$$

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

atau

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

11.3 Rangkaian seri sebagai pembagi tegangan



Gambar 11.6

Dari rangkaian diatas tegangan berada ditahanan R_3 dapat diitung sebagai berikut:

$$V = IR_1 + IR_2 + IR_3$$

$$V = I (R_1 + R_2 + R_3)$$

$$\text{Atau } I = \frac{V}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$\text{Sedang } V(R_3) = V_0 = IR_3$$

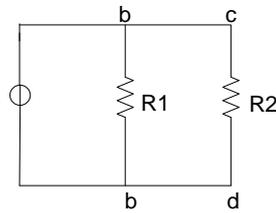
$$v(R_3) = \frac{v}{R_1 + R_2 + R_3} R_3$$

atau

$$V_0 = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} V$$

11.4 Rangkaian paralel dapat menjadi pembagi arus (current divider)

Perhatikan rangkaian dibawah ini:



Gambar 11.7

Jika ingin mengetahui arus yang mengalir pada R1 atau R2 atau menentukan harga I1 dan i2 dengan menentukan R1 dan R2 yang sesuai penjelasan hukum kirchoff

$$I = I_1 + I_2$$

$$\text{Dan } V_{ab} = V_{cd}$$

$$I_1 R_1 = I_2 R_2$$

Maka dengan demikian mensubstitusikan $I_2 = I - I_1$

$$I_1 R_1 = (I - I_1) R_2$$

$$I_1 R_1 = I R_2 - I_1 R_2$$

$$I_1 (R_1 + R_2) = I R_2$$

Atau

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I$$

dan dengan cara yang sama

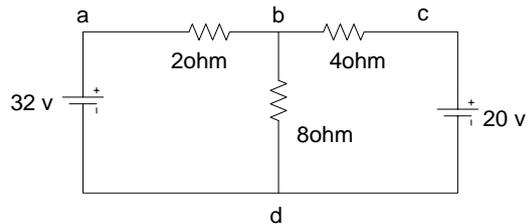
$$I_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

11.5 Menghitung arus pada rangkaian sederhana

11.5.1 Menggunakan metoda arus cabang

Cara penyelesaian metoda ini yang perlu diperhatikan adalah titik cabang. Setiap titik cabang diberi nama dan diperhatikan rangkaian tertutup (loop).

Contoh:



Kita ingin mengetahui i_1 , i_2 , dan i_3

Cara penyelesaiannya adalah

Pada titik b berlaku $i_1 + i_2 + i_3 = 0$(1)

Pada loop abda $2i_1 + 8i_1 = 32$(2)

Pada loop bcdb $-4i_2 + 20 - 8i_3 = 0$

$$4i_2 + 8i_3 = 20$$

$$i_2 + 2i_3 = 5$$
.....(3)

dari tiga persamaan dapat dihitung i_1 , i_2 dan i_3

MODUL XII

FISIKA LISTRIK MAGNET

HUKUM AMPERE DAN PENERAPANNYA

Tujuan Instruksional Umum:

Setelah mempelajari pokok bahasan ini diharapkan dapat memahami kemagnetan akibat arus listrik.

Tujuan Instruksional Khusus

- Dapat menggunakan hukum ampere untuk menentukan medan magnet.
- Dapat menghitung medan magnet di sekitar penghantar lurus, solenoida dan toroida.

Buku Rujukan Daftar Pustaka

- Sear & Zemansky Universitas Physics
- Kane & Strenheim Physics
- Sutrisno ITB
- Johanes Surya Olimpiade Fisika

Untuk bentuk-bentuk tertentu induksi magnet \vec{B} dapat lebih mudah dihitung dengan menggunakan hukum lain, yaitu hukum Ampere. Misalnya kita mempunyai suatu lengkungan tertutup C yang mengelilingi suatu kawat berupa i. hukum Ampere menyatakan bahwa dalam vakum, integral garis.

Disini elemen integrasi $d\vec{\ell}$ Diambil pada lengkungan tertutup C. hukum Ampere mengingatkan kita pada hukum Gauss dalam membahas medan listrik. Hukum Ampere mempermudah perhitungan \vec{B} untuk bentuk arus tertentu, seperti pada kumparan berbentuk toroida (bentuk kuweh donat).

Marilah selidiki hasil yang kita peroleh dengan hukum Biot-Savart, khususnya untuk induksi magnet \vec{B} yang dihasilkan oleh arus listrik dalam kawat lurus panjang. Pada contoh 4,5 telah kita peroleh induksi magnet pada jarak r dari kawat lurus panjang dialiri arus I, yaitu

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \dots\dots\dots(1)$$

Arah \vec{B} menyinggung lingkaran dengan jejari r, berpusat pada kawat, dan arahnya menurut arah putar sekrup agar berpindah kearah arus. Hal ini ditunjukkan pada

Gb. 12.1 nyatalah garis induksi yang dihasilkan berbentuk lingkaran-lingkaran sepusat. Persamaan (1) dapat kita tulis

$$B (2\pi r) = \mu_0 i$$

Karena $2\pi r$ merupakan panjang keliling lingkaran, atau $2\pi r = \oint dl$ sehingga

$$B \oint_{\text{lingkaran}} dl = \mu_0 i$$

$$\text{Atau } \oint_c Bdl = \mu_0 i \dots\dots\dots(2)$$

Disini c adalah lengkungan tertutup berupa lingkaran dengan jejari r , dan B menyinggung lingkaran tersebut.

Hubungan ini ternyata berlaku umum, tak peduli bentuk kawat yang dialiri arus, ataupun bentuk lengkungan integrasi C . dalam bentuk lebih umum persamaan (2) kita tulis sebagai

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 i$$

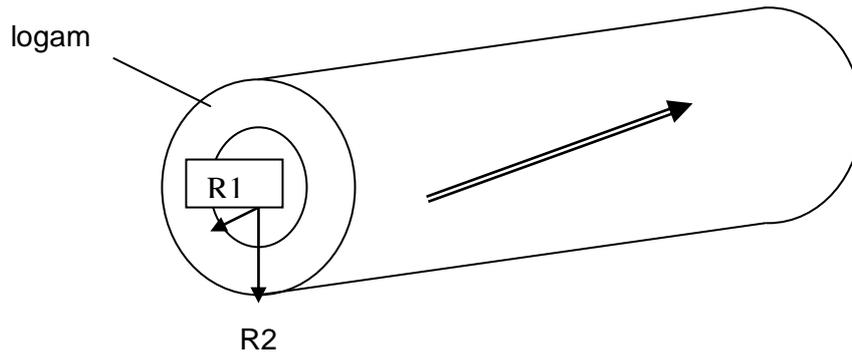
Disini C adalah lingkaran tertutup sembarang, dan I adalah arus yang dikelilingi C . bentuk umum ini tak lain adalah hukum Ampere mungkin anda mendapat kesan bahwa hukum Ampere berasal dari hukum Biot-Savart. Ini tidak benar, kedua hukum ini diperoleh dari eksperimen tersendiri.

Dalam teori listrik magnet yang lebih umum, hukum Ampere digunakan sebagai hukum dasar dari bentuknya diubah dalam bentuk Diferensial. Dalam bentuk ini hukum Ampere bersama persamaan lain membentuk persamaan Maxwell, yaitu hukum dasar teori elektromagnet.

Dari hukum Ampere orang dapat menurunkan hukum Biot-Savart. Agar lebih menghayati hukum Ampere, marilah kita bahas satu contoh dan kemudian kita gunakan untuk membahas induksi magnet dalam kumparan dan solenoid dan toroid dialiri arus.

Contoh 1.

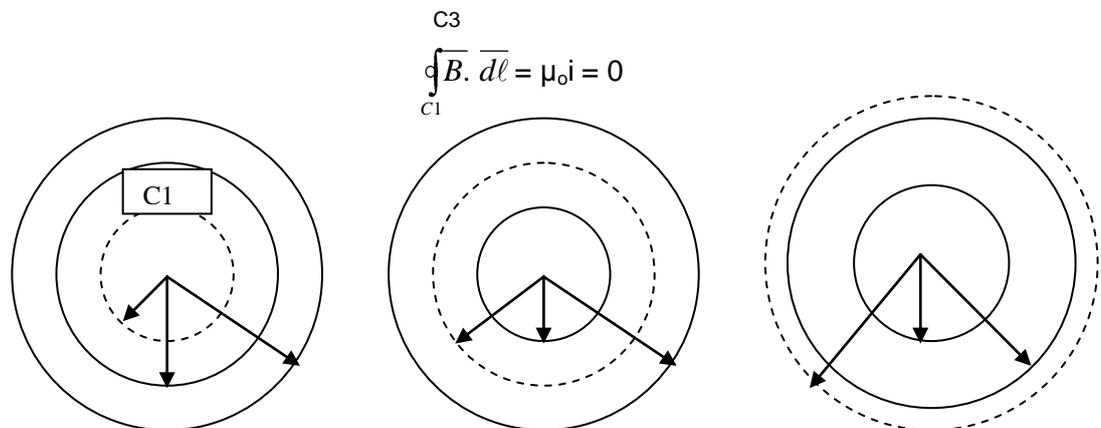
Sebuah selinder logam berongga mempunyai jejari dalam R1 dan jejari R2. selinder ini dialiri arus I yang tersebar serba sama pada penampang logam. Tentukan induksi magnet untuk [didalam rongga, dalam rongga dalam logam dan luar selinder]



Gambar 12.1 selinder logam berongga

Jawab

Untuk memecahkan persoalan ini kita gunakan hukum Ampere, karena simetri terhadap sumbu, sehingga semua garis induksi yang dihasilkan arus I haruslah berbentuk lingkaran, dalam bidang tegak lurus sumbu dan berpusat pada sumbu. Sesuai dengan bentuk garis induksi, kita buat lintasan tertutup berupa lingkaran C1, C2 atau C3 seperti gambar 12.2 untuk menentukan induksi magnet \vec{B} dalam rongga, kita buat lengkungan integrasi C1 dalam rongga. Lengkungan ini kita buat lingkaran dengan jejari r bila kita gunakan hukum Ampere kita peroleh.



Gambar 12.2 a. lengkungan integrasi C1 dalam rongga (b) lengkungan integrasi C2 dalam logam (c) lengkungan integrasi C3 diluar silinder

Karena arus yang dikelilingi C1, yaitu $I = 0$ (dalam rongga tak ada arus). Akibatnya induksi magnet dalam rongga haruslah sama dengan nol. Untuk menentukan induksi magnet dalam logam kita buat lengkungan C2 berupa hukum Ampere menyatakan:

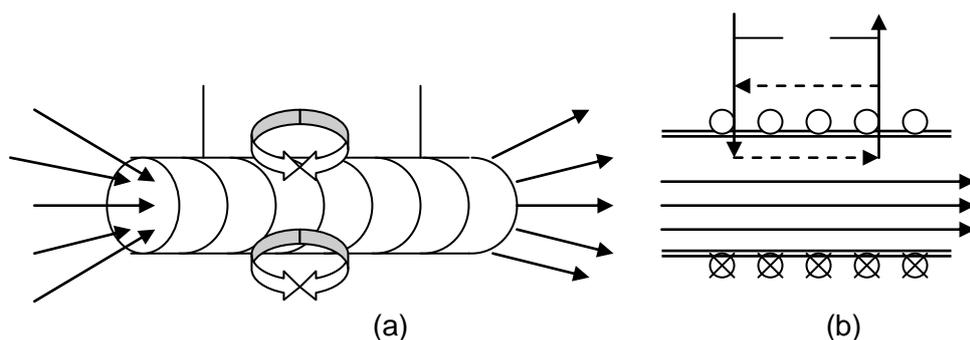
$$\oint_{C1} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 i$$

Arus I yang ada dalam lengkungan C2 ialah $I = jA$ dengan J rapat arus, dan A luas logam dalam C2. karena arus tersebar serba sama dalam penampang rapat arus

$$J = \frac{I}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}$$

Sedang luas $A = \pi(r^2 - R_1^2)$ sehingga arus listrik yang ada dalam C2 adalah

$$i = jA = \frac{(r^2 - R_1^2)}{(R_2^2 - R_1^2)} I$$



Gambar 12.3 (a) bentuk solenoida dan garis induksi oleh arus dalam solenoida. (b) penampang solenoida abcd adalah lengkungan tertutup untuk menghitung induksi magnet

Tampaklah induksi magnet pada bagian tengah solenoida serba sama. Ini dilukiskan dengan garis induksi yang sejajar dan berjarak sama. Pada bagian tepi induksi magnet tidak homogen.

Ini tampak dari garis induksi yang menyebar pada bagian tengah dilukiskan garis induksi yang menyatakan kebocoran induksi magnet. Bila solenoida panjang sekali, induksi magnet dibagian tengah solenoida dapat kita anggap serba sama. Bila lilitan cukup rapat kebocoran dapat kita abaikan, sehingga induksi magnet diluar kumparan dapat dianggap nol.

Untuk menghitung induksi magnet dalam solenoida, kita gunakan hukum Ampere. Lengkungan integrasi kita ambil seperti gkungan C pada Gb 12.3 hukum Ampere menyatakan

$$\oint_{abcd} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 i$$

Disini I adalah arus yang terkandung dalam lengkungan abcd integral garis

$\oint_{abcd} \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$ dapat dituliskan

$$\oint_{abcd} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \int_{ab} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} + \int_{bc} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} + \int_{cd} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} + \int_{da} \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$$

Akan tetapi,

$$\int_{bc} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \int_{da} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = 0$$

Sebab pada bc dan da, $\overline{d\ell}$ tegak lurus \overline{B} . Integral $\int_{cd} \overline{d\ell} = 0$ sebab pada cd

induksi magnet nol. Akibatnya kita peroleh

$$\oint_{abcd} \overline{B} \cdot \overline{d\ell} = \int_{ab} \overline{B} \cdot \overline{d\ell} = \int_{ab} B d\ell$$

Karena pada ab, \overline{B} sejajar $\overline{d\ell}$; sehingga sudut antar \overline{B} dan $\overline{d\ell}$, yaitu θ , sama dengan nol, dan $\overline{B} \cdot \overline{d\ell} = B dl \cos \theta = B d\ell$.

Selanjutnya karena induksi magnet B homogen, kita peroleh

$$\oint_{abcd} \overline{B} \cdot \overline{d\ell} = \int_{ab} \overline{B} \cdot \overline{d\ell} = B \int_{ab} d\ell = B\ell$$

Dimana ℓ adalah panjang garis ab.

Arus I yang terkandung dalam lengkungan abcd dapat kita hitung sebagai berikut. Bila sepanjang seluruh solenoida terdapat N buah lilitan sama rapat, dan tiap lilitan dialiri arus I, maka arus dalam tiap satuan panjang solenoida ialah

$\frac{NI}{L}$ karena lengkungan ab mempunyai panjang ℓ , arus I yang terkandung di dalamnya ialah

$$i = \frac{NI\ell}{L} \text{ dengan demikian menjadi}$$

$$B = \mu_0 \frac{NI}{L},$$

Atau induksi magnet dalam solenoida mempunyai harga

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

Kumparan Toroida

Sekarang kita bahas kumparan berbentuk toroida (cicin) dengan penampang segiempat, seperti Gb. 12.3. kumparan berisi udara, misalkan ada N lilitan yang rapat, dan arus I mengalir dalam kawat kumparan. Garis induksi magnet akan berbentuk lingkaran sepusat dengan cincin. Disini kita gunakan hukum Ampere untuk menghitung induksi magnet dalam kumparan. Untuk maksud ini kita ambil

lengkungan tertutup C berupa lingkaran jejari r seperti pada Gb 12.3. hukum Ampere menyatakan

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 i$$

Dimana I adalah arus yang ada dilengkungan C jadi $i = NI$ karena tiap lilitan dialiri arus I, dan ada N buah lilitan. Karena garis induksi magnet berupa lingkaran, induksi magnet \vec{B} tak bergantung $d\vec{\ell}$ pada C. sehingga integral garis

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \oint_C B d\ell = B \oint_C d\ell = B(2\pi r)$$

Karena $\oint_C d\ell =$ keliling lingkaran C $2\pi r$ akibatnya dari hukum ampere kita peroleh

$$B (2\pi r) = \mu_0 NI$$

Dan induksi magnet di cincin adalah

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

Induksi magnet diluar penampang cincin sama dengan nol ini dapat ditunjukkan dengan hukum Ampere, tetapi lengkungan integrasi C kita ambil diluar penampang cincin. Karena arus yang terkandung dalam C adalah nol induksi magnet diluar penampang cincin juga sama dengan nol.

MODUL XIII

FISIKA LISTRIK MAGNET

SIFAT KEMAGNETAN BAHAN

Tujuan Instruksional Umum :

Setelah mempelajari pokok bahasan ini diharapkan dapat memahami sifat kemagnetan bahan.

Tujuan Instruksional Khusus :

- Dapat membedakan besarnya induksi magnetik di udara dan di media lain.
- Dapat menjelaskan sifat-sifat kemagnetan bahan.

Buku Rujukan :

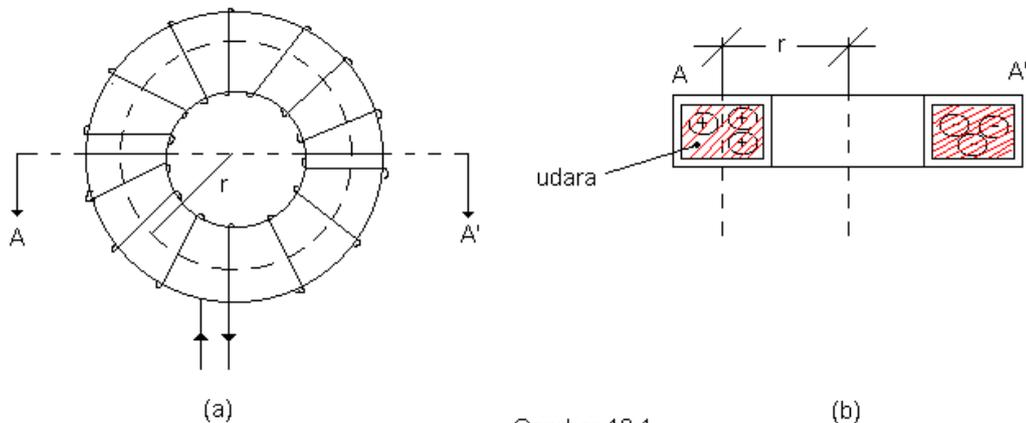
- | | |
|------------------|---------------------------------|
| ▪ Kane Sternheim | Physics 3 rd Edition |
| ▪ Sears Zemansky | University Physics |
| ▪ Sutrisno | Fisika Dasar IV ITB |
| ▪ Johannes Surya | Olimpiade Fisika |

Sifat Kemagnetan Bahan

Kita sudah mempelajari cara untuk menghasilkan medan magnet dengan arus listrik. Arus yang mengalir dalam kawat menimbulkan medan magnet dalam ruang dan sekitarnya. Medan magnet yang digunakan dalam praktek kebanyakan dihasilkan oleh arus dalam kumparan. Bila kumparan berisi udara, medan magnet yang dihasilkan terlalu lemah untuk dimanfaatkan. Agar dihasilkan medan magnet yang cukup kuat, kumparan kita isi dengan besi atau bahan sejenis besi. Sistem ini dikatakan membentuk elektromagnet. Elektromagnet adalah sumber medan magnet yang digunakan dalam berbagai alat listrik seperti generator, motor listrik, bel listrik, relay magnetik. Elektromagnet digunakan untuk menghasilkan medan magnet yang digunakan untuk penelitian spektroskopi, guna penentuan struktur atom atau molekul dalam bahan.

Medan Magnet seringkali juga dihasilkan oleh magnet permanen, yaitu suatu bahan yang menimbulkan medan magnet, walaupun tak ada arus listrik dialirkan dari luar. Bahan semacam ini sudah dikenal orang sejak jaman Yunani kuno. Beberapa abad sebelum masehi orang mendapatkan bahwa batuan tertentu menarik besi. Bahan ini banyak ditemukan di daerah yang bernama magnesias, yang sekarang ada di negara Turki. Kata magnet diambil dari rumah daerah ini. Anda tentu sudah mengenal magnet permanen dalam bentuk batang dan tapal kuda. Magnet permanen kini mempunyai peranan yang penting dalam alat-alat modern. Pemakaian terbesar adalah dalam pita magnetik, baik untuk audio, video, maupun untuk komputer. Magnet permanen juga digunakan dalam loud-speaker, alat ukur kumparan putar ampere meter, volt meter dan sebagainya dalam pesawat televisi, radio, komponen elektronika dalam motor listrik dan generator.

Disini kita akan membahas beberapa pengertian dasar tentang kemagnetan, terutama asal-usul peristiwa ini dan beberapa pengertian seperti intensitas magnet, magnetisasi, permeabilitas, dan suseptibilitas.



Gambar 13.1

Peristiwa kemagnetan akan lebih mudah dipahami bila kita ingat akan dielektrik. Bila dielektrik ditaruh dalam medan listrik pada permukaan akan timbul muatan induksi. Muatan induksi timbul karena dalam medan listrik molekul atom dielektrik membentuk dipol listrik.

Momen dipol listrik tiap satuan volume disebut polaritas \vec{P} . Muatan induksi yang timbul pada permukaan dielektrik mempunyai hubungan dengan polarisasi. Selanjutnya pengaruh muatan bebas yang menghasilkan medan listrik luar dinyatakan oleh medan perpindahan (displacement) \vec{D} . Besaran ini dihubungkan dengan kuat medan listrik dalam dielektrik \vec{E} melalui hubungan $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$. Tetapan ϵ disebut permitivitas listrik. Begitu pula polarisasi $\vec{P} = \chi \vec{E}$, dengan χ disebut susceptibilitas listrik. Pengertian dasar kemagnetan sejajar dengan pengertian dielektrik. Analaog dengan kuat medan \vec{E} orang menggunakan magnet \vec{B} . Induksi magnet dalam bahan akan menghasilkan momen dipol magnetik. Dan momen magnetik tiap satuan volum disebut magnetisasi, yaitu analogi dari polarisasi pada dielektrik. Magnetisasi berhubungan dengan arus permukaan yang analog dengan muatan induksi pada permukaan dielektrik.

Dalam bahan magnetik orang juga menggunakan medan \vec{H} yang disebut intensitas magnetik. Medan H ini hanya berhubungan dengan muatan bebas, dan analog dengan perpindahan D pada dielektrik. Analog dengan permitivitas ϵ orang menggunakan permeabilitas μ , dan analog dengan susceptibilitas listrik χ_c orang menggunakan susceptibilitas magnet.

13.1 Intensitas Magnetik

Marilah kita tinjau suatu bahan berbentuk toroida, yaitu bentuk kue donat atau ban dalam mobil yang dipompa keras. Pada bahan berbentuk toroida ini kita lilitkan kawat, dan kita alirkan arus listrik melalui kawat lilitan. Agar lebih jelas lihatlah Gb.13.2. adanya induksi magnet B dalam bahan akan menimbulkan momen dipol magnetik pada tiap atom. Mendapatkan gaya Lorentz dalam medan magnet, sehingga secara keseluruhan berpengaruh, bergerak dalam loop atau cincin. Ini dilukiskan dengan cincin arus pada Gb.13.1a. setiap cincin arus ini membentuk dipol magnet. Momen magnetik ini kita sebut Momen Magnetik Orbital. Momen magnetik total dalam bahan dapat dipandang berasal dari suatu permukaan I_s . Arus permukaan ini analog dengan muatan induksi yang timbul pada permukaan dielektrik bila ditaruh dalam medan listrik.

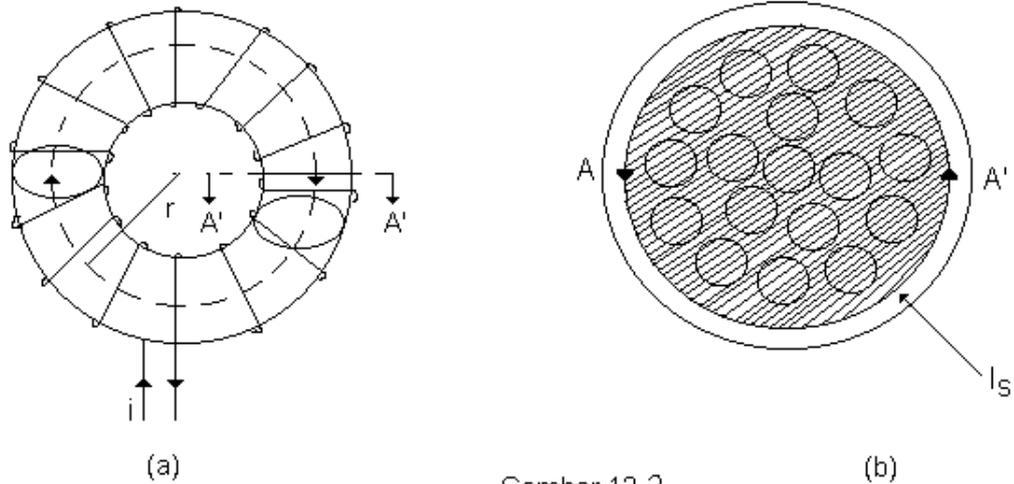
Atom atau ion tertentu memiliki momen magnetik yang timbul karena elektron berputar seperti gasing. Putaran seperti ini disebut spin. Tanpa medan magnet, momen magnetik spin tiap atom dalam bahan mempunyai arah acak. Sehingga tak ada momen magnetik total. Ini mengingatkan kita pada dielektrik polar, dimana tiap atom mempunyai momen dipol permanen. Bila dalam bahan ada magnet. Akibatnya akan timbul momen dipol resultan, dan ini dapat dibayangkan dihasilkan oleh suatu arus permukaan I_s juga.

Harap diingat bahwa arus permukaan adalah suatu arus ekuivalen, jadi bukan arus konduksi yang disebabkan oleh pembawa muatan. Arus yang mengalir pada kawat lilitan disebut arus bebas.

Dengan adanya arus permukaan I_s , induksi magnet dalam bahan berubah harganya. Bila panjang keliling rata-rata toroida adalah :

$L = 2 \pi a$ (Gb.13.2), maka dari hukum Ampere dapatlah kita peroleh intensitas magnetik total dalam bahan, yaitu :

$$B = \frac{\mu_o Ni}{L} + \frac{\mu_o I_s}{L}$$



Gambar 13.2

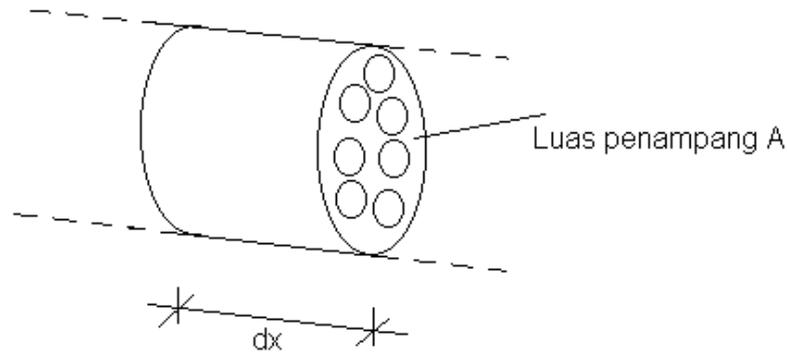
Dimana N menunjukkan banyaknya lilitan pada toroida, I arus konduksi pada kawat lilitan. Bila jejari toroida rata-rata a jauh lebih besar dari pada garis tengah penampang, medan dalam toroida dapat dianggap homogen.

Bagaimanakah hubungan antara arus permukaan I_s dengan momen magnetik induksi dalam bahan? Momen dipol resultan tiap volum bahan kita sebut magnetisasi M . Besaran ini dapat dihubungkan dengan arus permukaan I_s sebagai berikut.

Marilah kita tinjau bagian toroida bahan sepanjang $d\ell$, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13.3.

Arus permukaan yang mengalir pada bagian ini kita sebut dI_s .

Karena luas penampangnya A , maka momen magnetik resultan dalam bagian toroida, arus permukaan tiap satuan panjang haruslah sama dengan $dm = (dl_s)A$. Bila arus permukaan I_s tersebar merata sepanjang keliling toroida, arus permukaan tiap satuan panjang haruslah sama dengan I_s/L .



Gambar 13.3 Bagian dari toroida bahan dengan panjang \overline{dl}

Untuk bagian sepanjang $d\ell$, arus permukaan yang mengalir adalah

$$dls = \frac{I_s}{L} d\ell$$

Akibatnya momen dipol dalam bagian ini adalah

$$Dm = \frac{I_s}{L} A d\ell = \frac{I_s}{L} dv$$

Dari definisi magnetisasi M , dapat kita peroleh momen magnetik dalam bagian bervolum dv , yaitu

$$Dm = Mdv$$

bila persamaan diatas kita bandingkan, kita peroleh

$$\frac{I_s}{L} = M$$

Dari persamaan-persamaan diatas, kita peroleh induksi magnet

$$B = \mu_0 \frac{Ni}{L} \mu_0 M$$

Suku pertama dalam persamaan berhubungan dengan arus bebas i . Agar dapat membedakan pengaruh arus bebas I dan arus permukaan, (arus induksi) kita definisikan besaran medan magnet yang baru, yaitu yang disebut intensitas magnet H . Untuk medan magnet dalam bahan toroida, intensitas magnet mempunyai harga.

$$H = \frac{Ni}{L}$$

Satuan untuk H adalah Am^{-1} Bila kita gunakan persamaan kita peroleh harga

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

Harap diperhatikan bahwa persamaan diatas, dimana intensitas magnet H hanya bergantung pada arus bebas I , hanya berlaku untuk bahan berbentuk toroida penuh. Untuk bahan yang punya ujung, misalnya batang magnet, atau magnet berbentuk bola, adanya magnetisasi akan menimbulkan pengutuhan.

Dalam hal ini intensitas magnetik akan bergantung juga pada kekuatan kutub magnet. Ini akan dibahas kemudian. Dalam banyak bahan, magnetisasi M sebanding dengan intensitas magnetik H . Ini dituliskan sebagai

$$M = X_m H$$

Tetapan X_m disebut *suseptibilitas magnetik*

Selanjutnya persamaan dapat dituliskan sebagai

$$B = \mu_0 H + \mu_0 X_m H$$

$$B = \mu_0 \left(1 + X_m \right) H$$

kita definisikan *permeabilitas magnetik* sebagai

$$\mu = \mu_0 \left(1 + X_m \right) = \mu_0 K_m$$

tetapan K_m disebut permeabilitas relatif. Selanjutnya persamaan dapat kita

tuliskan sebagai $B = \mu H = \mu_0 K_m H$

Bila toroida kosong tak berisi bahan, maka tak ada momen magnetik induksi, sehingga magnetisasi $M=0$ dan suseptibilitas $X_m=0$ dalam hal ini $\mu = \mu_0$. tak heran tetapan μ_0 yang kita kenal dari hukum bio-savart disebut permeabilitas Vakum. Diatas sudah disebutkan ada dua macam momen magnetik yang ditimbulkan oleh magnetik yang ditimbulkan oleh medan magnet. Dalam banyak hal momen induksi timbul oleh gerak efektif seluruh elektron dalam atom, karena adanya medan magnet. Moment magnetik induksi seperti ini dikatakan momen magnetik orbital. Dalam hal lain tiap atom memiliki momen magnetik spin, dan medan magnet menyebabkan pemutaran (orientasi) arah momen magnetik, sehingga secara rata-rata momen magnetik tidak lagi sama dengan nol.

Dalam hal pertama yaitu momen magnetik orbital arah gerak elektron adalah demikian sehingga arah momen magnetik berlawanan dengan arah medan magnet. Jadi arah arus permukaan juga berlawanan dengan arus bebas. Akibat fluks induksi magnet dengan adanya bahan menjadi berkurang, sehingga induksi magnet juga berkurang. Hal ini berarti suseptibilitas bahan seperti negatif atau $X_m < 0$. bahan seperti ini dikatakan bersifat diamagnetik. Karena sifat diamagnetik ditimbulkan oleh orbital elektron dan semua atom mempunyai elektron orbital maka semua bahan bersifat diamagnetik.

Sifat diamagnetik ini tampak bila bahan tak memiliki sifat paramagnetik ditimbulkan oleh momen magnetik spin yang menjadi terarah oleh medan magnet. Sifat paramagnetik terjadi pada atom dengan momentum sudut spin tak sama dengan nol. Dalam hal ini momen magnet induksi akan menghasilkan arus permukaan Is searah dengan arus bebas. Akibatnya fluks induksi magnet bertambah besar dengan adanya bahan. Hal ini berarti suseptibilitas magnetik bahan paramagnetik mempunyai harga positif. Kedua macam kemagnetan ini merupakan kemagnetan yang lemah. Perubahan fluks induksi magnet dengan adanya bahan tidaklah besar. Beberapa bahan diamagnetik dan paramagnetik beserta suseptibilitasnya ditunjukkan pada tabel 13.1

Tabel 13.1 Suseptibilitas magnetic $X_m = \frac{M}{H}$ untuk berbagai bahan (pada temp. kamar)

Bahan (Paramagnetik)	$X_m (x 10^{-6} \text{ mks})$	Bahan (diamagnetik)	$X_m(x 10^{-6} \text{ mks})$
Alumunium	+ 0,82	Bismut	-0,7
Kalsium	+ 1,4	Kadmium (Cd)	-0,23
Kromium	+ 4,5	Tembaga	-0,11
Oksida tembaga (CuO)	+ 1,5	Germanium	-0,15
Oksida besi(Fe ₂ O ₃)	+ 26,0	Helium	-0,59
Magnesium	+ 0,69	Emas (Au)	-0,19
Mangan	+ 1,0	Timah hitam	-0,18
O ₂ Cair (-219 °C)	+ 390	seng	-0,20
Platina	+ 1,65		
Tantalium	+ 1,1		

Bahan Magnet

Dalam beberapa bahan pada keadaan tertentu suseptibilitas magnetik

$X_m = M/H$ mempunyai harga yang sangat besar, yaitu mencapai harga ribuan.

Orang telah membuat bahan dengan harga suseptibilitas sebesar 1.000.000 bahan seperti ini disebut bahan feromagnetik.

Dalam bahan feromagnetik momen magnetik atom tetangga berinteraksi dengan kuat sehingga suatu daerah dalam bahan mempunyai momen magnetik M dan intensitas magnet H tidaklah linier. Diatas harga temperatur yang disebut temperatur curie, bahan feromagnetik bersifat paramagnetik. Karena kemagnetan yang lemah, orang mengatakan bahan diamagnetik dan faramagnetik bersifat tidak magnetik. Jadi yang dimaksud dengan bahan diamagnetik adalah bahan yang bersifat feromagnetik atau ferimagnetik. Bahan seperti ini dapat menarik besi pada keadaan tertentu. Kemampuan ini sebenarnya berhubungan dengan harga berbeda dalam interaksi antara atom tetangga. Bahan ferimagnetik mempunyai kemagnetan tak sekuat feromagnetik.

Suseptibilitas magnetik X_m pada bahan feromagnetik bergantung pada harga intensitas magnetik H . Jadi hubungan antara M dan H tidaklah linier seperti pada bahan diamagnetik dan paramagnetik tabel 13.2 menunjukkan harga B dan H untuk besi lemah.

Dari tabel 13.2 dapat kita hitung harga magnetisasi M pada berbagai harga intensitas magnet H kita juga dapat menghitung permeabilitas relatif.

$$K_m = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + X_m$$

Tampaklah permeabilitas relatif maksimum untuk besi lemah sekitar 500. temperatur curie untuk besi lemah ialah 770°C , berarti di atas temperatur ini besi lemah bersifat paramagnetik. Bahan dengan permeabilitas relatif tertinggi ialah yang disebut supermalloy. Yang mempunyai $K_m=10^6$ dengan temperatur curie 400°K .

Table 13.2 Harga rapat fluks dan intensitas magnetik untuk besi lemah.

Sifat magnetik besi lemah			
Intensitas Magnetik H (A m^{-1})	Rapat fluks B (telsa)	Permeabilitas $\mu = B/H$ (satuan SI) ($\times 10^{-4}$)	Suseptibilitas $X_m=M/H$ Satuan SI
0	0	3,1	249
10	0,0042	4,2	329
20	0,010	5,0	329
40	0,028	7	559
50	0,043	8,6	679
60	0,095	16	1.269
80	0,45	56	4.500
100	0,67	67,5	5.300
200	1,18	59	4.700
500	1,44	28	2.300
1000	1,58	15,8	1.250
10000	1,72	1,72	136
100000	2,26	0,226	17

MODUL XIV

FISIKA LISTRIK MAGNET

KURVA HISTERISIS DAN MAGNET PERMANEN

Tujuan Intruksional Umum

Setelah mempelajari pokok bahasan ini diharapkan dapat memahami tentang kurva histeris dan listrik permanen.

Tujuan Intruksional Khusus

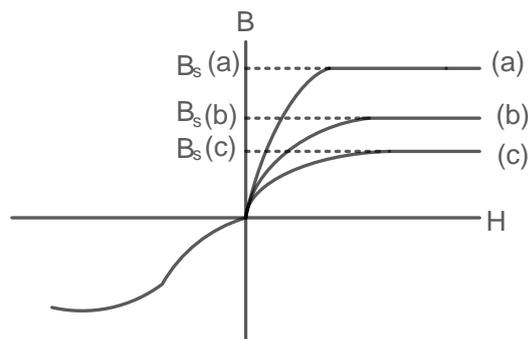
- Dapat mengetahui tentang kegunaan kurva histeris.
- Dapat menggunakan hukum Ampere untuk intensitas magnet
- Dapat mengetahui manfaat magnet permanen.

Buku Rujukan Daftar Pustaka

- | | |
|--------------------|--------------------|
| ▪ Sear & Zemansky | University Physics |
| ▪ Kane & Strenheim | Physics |
| ▪ Sutrisno | ITB |
| ▪ Johanes Surya | Olimpiade Fisika |

14.1 Kurva Histeris

Dari tabel 14.2 modul 13 nyata bahwa untuk bahan magnetik yaitu bahan feromagnetik, magnetisasi M tidaklah berbanding lurus dgn intensitas magnet H . Hal ini tampak dari kenyataan bahwa harga suseptibilitas magnet X_m bergantung pada intensitas magnet H . Bentuk umum kurva induksi magnet B sbg fungsi intensitas magnet H terlihat pada gambar 14.1

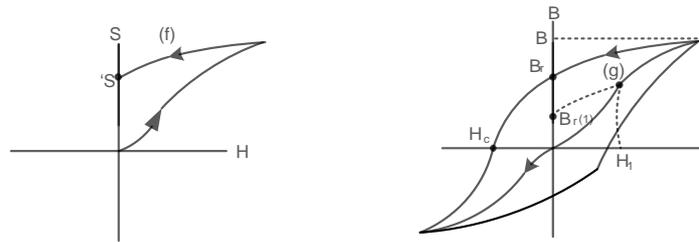


Gambar 14.1 Kurva induksi normal

Kurva $B(H)$ seperti ini disebut kurva induksi normal. Tampaklah kurva tidak berbentuk garis lurus, sehingga dikatakan hubungan B dan H tak linier. Setelah harga intensitas magnetik tertentu. Tampak pula harga induksi magnet tak banyak berubah lagi. Hal ini disebut saturasi dan harga induksi magnet untuk keadaan saturasi B_s atau induksi magnet saturasi.

Bahan yg mencapai saturasi utk H harga yg rendah disebut magnet lunak kurva (a). Bahan C yg saturasi terjadi pada harga yang tinggi disebut magnet keras.

Bila setelah mencapai saturasi, intensitas magnet H diperkecil, ternyata harga B tak terletak pada kurva semula. Ini ditunjukkan pada gb.14.1. Pada harga $H = 0$. Induksi magnet atau rapat fluks B mempunyai harga $B_r = 0$ yaitu remenensi, yg menyatakan kemagnetan remanen. Ini berlaku selama emperatur ada dibawah temperatur curie T_c , jadi bila arus pada toroida dimatikan ($I=0$) dalam bahan masih tersimpan fluks induksi harga B_r ini disebut induksi magnet remanen atau remanensi bahan.



Gambar 14.2 (a) bila harga H diperkecil harga B adalah pada kurva (f)
 (b) kurva histeresis bila sampai pada $H=H_1$. H diperkecil harga B pada kurva (g) dan B_r mencapai harga B_r (i) pada $H=0$

Bila mencapai nol harga intensitas magnet H dibuat negatif (dgn membalik arah arus lilitan), kurva $B(H)$ akan memotong sumbu H pada harga H_c . Intensitas magnet H_c inilah yg diperlukan untuk membuat agar rapat fluks $B=0$ atau menghilangkan fluks dalam bahan. Intensitas magnet H_c disebut koersivitas bahan. Bila selanjutnya harga H positif hingga saturasi lagi, kurva $B(H)$ membentuk suatu lengkungan tertutup yg disebut kurva histeris.

Pemakaian magnet permanen kini sangat luas konsumsi bahan magnet permanen terbesar ialah pada pita magnetik baik utk konsumen musik maupun utk komputer. Dalam komputer juga digunakan lapisan magnetik pada piringan atau silinder, guna menyimpan memori cadangan. Bahan magnetik lunak dgn koersivitas H_c rendah dan B_r tinggi mempunyai permeabilitas maksimum yang tinggi. Bahan seperti ini terutama digunakan untuk memperbesar fluks. Dgn arus yg tak terlalu besar, dapat dihasilkan fluks yg besar. Bahan seperti ini digunakan untuk elektro magnet, guna keperluan generator listrik, motor listrik, transformator dan induktor.

Tabel 14.1 BAHAN MAGNETIK LUNAK

NAMA	Komposisi (%)			Permeabilitas maksimum	Koersifitas Hc (Oe)	Bs (gauss)	Tc (°C)
	Ni	Fe	Lain				
- Besi	-	100	-	5000	1,0	21.500	770
- Besi Silikon	-	96	4 Si	7000	0,5	19.700	696
- Besi silikon (grain orientet)	-	97	3 Si	40000	0,1	20.000	746
- Mumetal	77	16	6Cu, 2Cu	100.000	0,05	6500	
- Supermalloy	79	16	5 Ma	1.000.000	0,002	7900	400

1 oersted = 1 Oe = $10^3 / 4\pi \text{ Am}^{-1}$
 1 gauss = 1 G = 10^{-2} Telsa
 untuk vakum 1 Oe = 1 G (cgs)

Tabel 14.2 BAHAN MAGNET KERAS

Nama	Komposisi (% berat)	Remanensi Br (gauss)	Koersivitas Hc (Oe)
- Baja 1 C	1% C1, 99% Fe	900	51
- Alnico 5	8% Al, 15% Ni, 24% Co, 3% Cu, 50% Fe	12000	720
- Alnico 8	8% Al, 14% Ni, 38% Co, 3% Cu, 29% Fe, 8% Ti	7100	2000
- Fe ₂ O ₃	bahan magnet untuk pita magnetik	-	300
- Cr O ₂ (Kromium dioksida)	bahan magnet untuk pita magnetik	-	400

14.2 Hukum Ampere untuk intensitas magnet H

Marilah kita kembali sejenak pada toroida yang dililit kawat berarus telah kita ketahui bahwa disamping arus konduksi pada kawat, yaitu I pada permukaan toroida terdapat pula arus ekivalen yang kita nyatakan sebagai arus permukaan I_s . Bila kita gunakan hukum Ampere untuk induksi magnet B kita dapatkan

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \int_C d\ell (i_{bebas} + I_s)$$

disini C adalah suatu lengkungan tertutup, dan $(i_{bebas} + I_s)$ adalah arus total yang menembus i_{bebas} adalah arus konduksi pada kawat ini di tunjukkan pada gambar 14.3. arus permukaan i menembus lengkungan tertutup C dapat dituliskan sebagai

$$I_s = \int_C \vec{j}_s \cdot d\vec{\ell}$$

dimana \vec{j}_s adalah vektor rapat arus (arus tiap satuan panjang) dengan

besar $\vec{j}_s = \frac{I_s}{L}$, dengan arah tegak lurus penampang, dan $d\vec{\ell}$ elemen

perpindahan C . Telah dibahas didepan bahwa $\frac{I_s}{L} = M$ yaitu magnetasi

bahan. Dengan demikian persamaan dapat ditulis $I_s = \int_C M \cdot d\vec{\ell}$ bila ini kita

masukkan persamaan kita peroleh

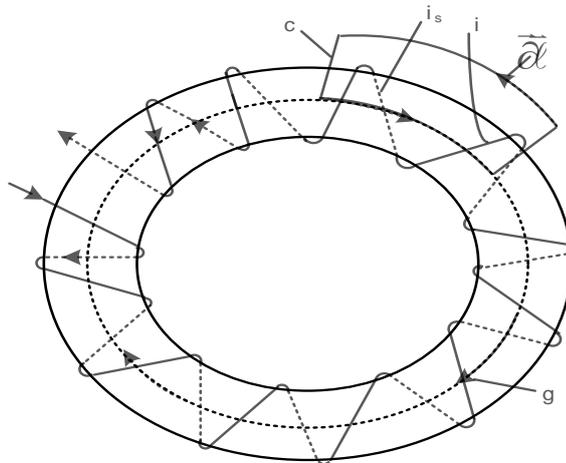
$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 i_{bebas} + \mu_0 \int_C M \cdot d\vec{\ell} \quad \text{atau} \quad \oint_C (\vec{B} - \mu_0 \vec{M}) \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 i_{bebas} \dots \dots \dots (4)$$

Karena

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = i_{bebas} \dots \dots \dots (5)$$

persamaan 5 merupakan hukum Ampere untuk medan intensitas magnet \vec{H}

perhatikan bahwa hukum Ampere dalam bentuk ini hanya menyangkut arus I yang mengalir pada kawat. ini mengingatkan kita pada hukum gauss untuk medan perpindahan \vec{D} dalam dielektrik



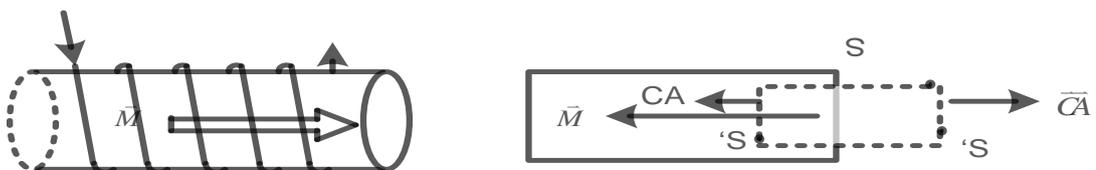
Gambar 14.3 Toroida berisi bahan dililit kawat berarus

14.3 MAGNET PERMANEN

Untuk bahan membentuk toroida yang dililit kawat berarus i , telah kita definisikan intensitas magnet H sebagai

$$H = \frac{Ni}{L}$$

Disini N merupakan banyaknya lilitan kawat dan L adalah rata-rata keliling toroida. Harga intensitas magnetik H ini berlaku baik untuk toroida berisi maupun kosong. Untuk toroida nyatakan bahwa bila arus nol intensitas magnetik H dalam bahan juga sama dengan nol. Bila bahan bersifat feromagnetik kurva $B(H)$ mempunyai histerisis. Bila H berubah menjadi nol, rapat fluk B mempunyai $B_r \neq 0$, yaitu remensi yang menyatakan kemagnetan remanen. Ini berlaku selama temperatur Curie T_c . Dalam keadaan ini dalam hubungan feromagnetik tidak berlaku hubungan $B = \mu H$. Sekarang marilah kita tinjau bahan feromagnetik yang tidak berbentuk toroida, tetapi berbentuk batang silinder seperti gambar 14.4



Gambar 14.4 (a) batang feromagnetik dililit kawat berarus (b) S adalah permukaan Gauss

Dalam bahan berbentuk batang atau bentuk lain dengan batas ujung dan pangkal intensitas magnet H tidaklah disebabkan oleh konduksi saja. Intensitas magnetik juga ditimbulkan oleh kutub magnet, yang terjadi karena adanya komponen vektor magnetisasi \vec{M} tegak lurus pada permukaan batas bahan. Marilah kita bahas lebih jauh kita mulai dari hukum Gauss untuk medan induksi magnet \vec{B}

Yaitu :

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = 0 \dots\dots\dots(6)$$

dimana S yaitu suatu permukaan tertutup. Integral diatas sama dgn nol karena garis induksi haruslah berbentuk garis lengkungan tertutup. Selanjutnya hal ini disebabkan karena sumber induksi magnet yang paling sederhana adalah cincin arus atau dipol magnet. Hingga kini orang belum menemukan muatan magnet atau monopol magnet.

Kita gunakan hubungan antara hubungan magnet \vec{B} , intensitas magnet \vec{H} dan magnetisitas \vec{M} yaitu :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}$$

Kita ambil integral permukaan tertutup terhadap permukaan Gauss pada permukaan gambar 14.4 (b) permukaan Gauss kita ambil berupa kotak silinder S

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} = \mu_0 \oint_S \vec{H} \cdot d\vec{A} + \mu_0 \oint_S \vec{M} \cdot d\vec{A} = 0$$

sama dengan persamaan 6 selanjutnya ini berarti

$$\oint_S \vec{H} \cdot d\vec{A} = - \oint_S \vec{M} \cdot d\vec{A} \dots\dots\dots(7)$$

bila kita gunakan permukaan gauss seperti pada gambar 14.4 (b) maka

$$\oint_S \vec{M} \cdot d\vec{A} = \int_{S_1} \vec{M} \cdot d\vec{A} + \int_{\substack{\text{selubung} \\ \text{selinder}}} \vec{M} \cdot d\vec{A} + \int_{S_1} \vec{M} \cdot d\vec{A}$$

akan tetapi $\int_{\substack{\text{selubung} \\ \text{selinder}}} \vec{M} \cdot d\vec{A} = 0$ karena $\vec{M} \perp d\vec{A}$

pada selubung selinder dan $\int_{S_2} \vec{M} \cdot d\vec{A} = 0$

sebab magnetisasi $\vec{M} = 0$ diluar bahan

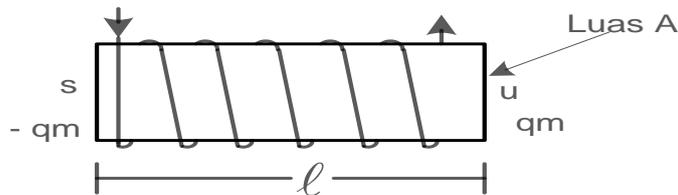
$$\begin{aligned} \text{selanjutnya } \int_{S_2} \vec{M} \cdot d\vec{A} &= + \int_{S_2} \vec{M} \cdot d\vec{A} \cos \theta \\ &= \int_{S_2} \vec{M} \cdot d\vec{A} \cos (180^\circ) = - MA \end{aligned}$$

persamaan (7) menjadi

$$\int_s \vec{M} \cdot d\vec{A} = - MA \dots \dots \dots (8)$$

sekarang marilah kita perhatikan batang magnet sebagaimana di lukiskan pada gambar 14.4 . Momen magnet total batang haruslah

$$P_m = \int M dV = MV = MA\ell$$



Gambar 14.5 Dipol magnet dapat kita bayangkan sbg $p = \ell q_m$ dgn q_m kuat kutub

Momen dipol ini dapat di bayangkan seolah olah di dihasilkan oleh kutub $+ q_m$ dan $- q_m$ padas kedua ujung batang. Dipol magnet yang dihasilkan ialah $P_m = \ell q_m$ nyata bahwa kuat kutub dari persamaan (8)

$$q_m = MA = - \int_s \vec{M} \cdot d\vec{A}$$

Dalam satuan MKS , satuan kutub haruslah sama dengan magnetisasi kali satuan luas. Jadi satuan kutub haruslah

$$(Am^{-1})(m^2) = Am$$

harap diingat bahwa q_m bukanlah muatan magnet yg sebenarnya atau monopol magnet, karena q_m tak lepas dari magnet selanjutnya persamaan 7 menjadi

$$\oint_S \vec{H} \cdot \vec{dA} = q_m \dots \dots \dots (9)$$

Inilah bentuk persamaan gauss untuk medan intensitas magnet H bila ada kuat kutub. Intensitas magnet H mempunyai 2 komponen , komponen yg ditimbulkan oleh arus i pada lilitan kita sebut H_0 dan ditimbulkan oleh kuat kutub q_m kita sebut \vec{H}_1

$$\text{Jadi } \vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}_1$$

Tetapi \vec{H}_0 yang ditimbulkan oleh arus bebas i membentuk garis gaya tertutup sehingga $\oint_S \vec{H}_0 \cdot \vec{dA} = 0$

$$\text{Hal ini berarti persamaan (9) dapat ditulis } \oint_S \vec{H}_1 \cdot \vec{dA} = q_m$$

Untuk magnet permanen tak ada arus bebas i satu-satunya medan \vec{H} disebabkan oleh kuat kutub q_m . selanjutnya kuat kutub $q_m = - \oint_S \vec{M} \cdot \vec{dA}$

Ditimbulkan oleh magnetisasi karena induksi magnet permanen B_r karena

$$\vec{B}_r = \mu_0 \vec{M}$$

Hal ini bila kita tahu remenensi B_r suatu bahan kita dapat menghitung kuat kutub q_m . Bila kuat kutub berupa titik garis gaya magnet (utk medan vektor \vec{H}) haruslah radial dan homogen. Dgn hukum gauss persamaan (9) dapatlah menjadi

$$\oint_S \vec{H}_1 \cdot d\vec{A} = \vec{H}_1 (4\pi r^2) = q_m \quad \text{atau}$$

$$\vec{H}_1 = \frac{q_m}{4\pi^2} \hat{r}$$

akibatnya dalam ruang disekitar kutub akan timbul medan induksi magnet dgn harga

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}_1 = \mu_0 \frac{q_m}{4\pi^2} \hat{r}$$

Bila ada magnet permanen disekitarnya dengan kuat kutub q_m . Gaya yg bekerja pada $q_{m'}$ haruslah sama dengan

$$\vec{F} = q_{m'} \vec{B} = \mu_0 \frac{q_m q_{m'}}{4\pi^2} \hat{r}$$

nyata bahwa bila kita berbicara dgn pengertian kuat kutub kita dapat menggunakan hukum coloumb, seperti pada muatan listrik. Kuat kutub untuk kutub utara kita nyatakan dgn positif dan kutub selatan dgn tanda negatif.