

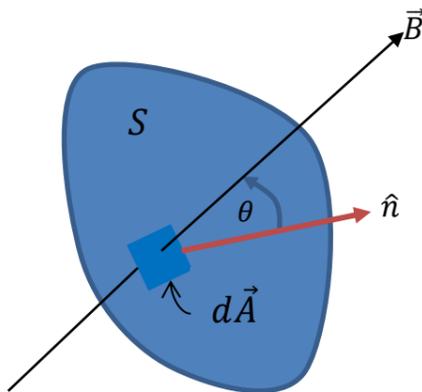
Isi

Fluks Magnetik ..... 1  
 Hukum Faraday ..... 1  
 Hukum Lenz ..... 2  
 Gerak Gaya Gerak Listrik ..... 2  
 Medan Listrik Induksi ..... 2  
 Arus Eddy ..... 3  
 Momen Dipol Magnetik ..... 3  
 Momen Magnet Intrinsik ..... 3  
 Magneton Bohr ..... 3  
 Momen Magnet Total Atom ..... 3  
 Magnetisasi ..... 3  
 Klasifikasi Material Magnetik ..... 3  
 Pustaka ..... 3

Fluks Magnetik

Jumlah garis gaya magnetic yang melewati luasan disebut sebagai fluks magnetic. Fluks magnetic dinotasikan sebagai  $\Phi_B$ . Fluks magnetic merupakan besaran scalar dengan satuan SI adalah weber (Wb).

Jika vector elemen luas  $d\vec{A}$  ditempatkan dalam medan magnet seragam dengan



Gambar 1

Fluks magnetic  $\Phi_B$  melewati luasan  $d\vec{A}$ , maka

$$d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot \hat{n} dA$$

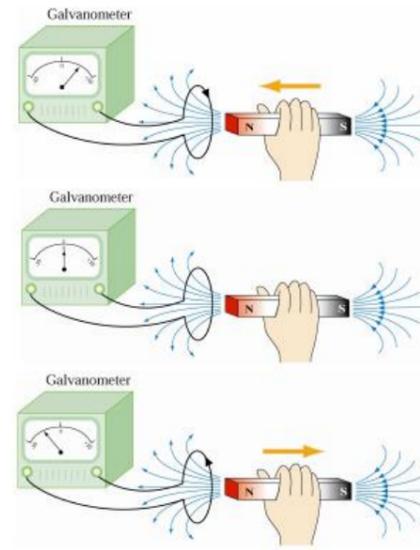
Atau dapat dituliskan sebagai

$$\Phi_B = \int B dA \cos \theta$$

Dengan  $\theta$  adalah sudut yang terbentuk antara medan magnet dan elemen vector luasan.

Hukum Faraday

Hukum Faraday menyatakan bahwa: "besar gaya gerak listrik (ggl) induksi dalam suatu rangkaian berbanding lurus dengan laju perubahan fluks magnetik"



Gambar 2

Arah gerak magnet menentukan arah arus pada loop. Adanya arus pada loop ditandai dengan adanya penyimpangan pada jarum galvanometer. Arus yang dihasilkan ini disebut sebagai arus induksi. Jika kutub utara magnet yang digerakkan mendekati loop maka arah arus yang dihasilkan akan berlawanan dengan arah arus bila kutub selatan yang digerakkan mendekati loop.

Jika  $\epsilon$  gaya gerak listrik induksi akibat dari perubahan fluks  $d\Phi_B$  dalam waktu  $dt$ , maka kita dapat menuliskan bahwa hukum Faraday pada induksi elektromagnetik diberikan oleh

$$\epsilon \propto - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\epsilon = -c \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Dengan  $c$  adalah sebuah konstanta.

$$\epsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Dengan  $N$  adalah konstanta dan disebut sebagai jumlah lilitan pada kumparan.

Karena  $\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A}$ , maka

$$\epsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -N \frac{d}{dt} \left( \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \right)$$

Untuk  $N = 1$ , maka

$$\epsilon = \frac{d}{dt} \left( \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \right)$$

Selanjutnya, kita ketahui bahwa

$$\epsilon = \int \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Maka,

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{r} = \frac{d}{dt} \left( \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \right)$$

Persamaan ini merupakan bentuk integral dari hukum Faraday pada induksi elektromagnetik. Tanda negative (-) menyatakan bahwa arah arus induksi berlawanan dengan penyebabnya.

Selanjutnya, kita gunakan teorema Stokes, yaitu

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_S \nabla \times \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Maka

$$\int_s \nabla \times \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{d}{dt} \left( \int_s \vec{B} \cdot d\vec{A} \right)$$

$$\int_s \nabla \times \vec{E} \cdot d\vec{A} - \frac{d}{dt} \left( \int_s \vec{B} \cdot d\vec{A} \right) = 0$$

$$\int_s \left( \nabla \times \vec{E} + \frac{d\vec{B}}{dt} \right) \cdot d\vec{A} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{d\vec{B}}{dt} = 0$$

atau

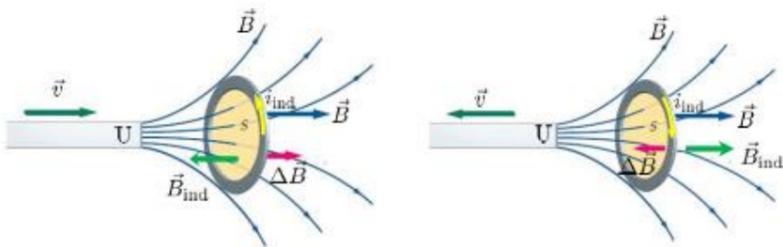
$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{d\vec{B}}{dt}$$

Persamaan ini adalah bentuk diferensial dari hukum Faraday pada induksi elektromagnetik.

### Hukum Lenz

Hukum Lenz menyatakan bahwa

“arah arus induksi dalam suatu kumparan sedemikian rupa sehingga medan magnet yang dihasilkan arus tersebut berlawanan dengan perubahan fluks penyebabnya”



Gambar 3

Contoh: Sebuah loop penghantar berbentuk lingkaran dengan jari-jari  $a$  dan resistansi  $R$  ditempatkan dalam medan magnet yang berubah terhadap waktu,  $\vec{B}(t)$ . Tentukan besar arus induksi jika medan magnet berkurang.

Penyelesaian: arus induksi

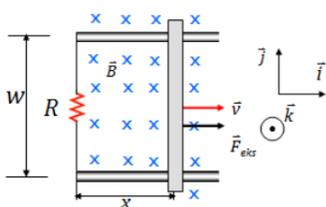
$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{1}{R} \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{1}{R} \frac{d}{dt} (BA) = \frac{A}{R} \frac{dB}{dt}$$

Karena luas  $A = \pi a^2$ , maka

$$I = \frac{\pi a^2}{R} \frac{dB}{dt}$$

### Gerak Gaya Gerak Listrik

Tinjau sebuah konduktor dengan panjang  $l$  ditempatkan dalam medan magnet yang arahnya masuk ke dalam bidang kertas, seperti pada gambar 2. Asumsikan bahwa konduktor bergerak tegak lurus terhadap medan dengan kecepatan konstan.



Gambar 4

Fluks magnetic yang melewati rangkaian adalah

$$\Phi_B = BA = Blx$$

Dengan menggunakan hukum Faraday,

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} = - \frac{d}{dt} (Blx) = -Bl \frac{dx}{dt}$$

Tanda negative pada hukum Faraday ini menjelaskan arah arus induksi yang timbul pada proses induksi elektromagnetik.

Karena  $\frac{dx}{dt} = v$ , maka

$$\varepsilon = -Blv$$

Karena ggl induksi ini, maka arus akan terinduksi dalam konduktor yang diberikan oleh

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = - \frac{Blv}{R}$$

Dengan  $R$  adalah resistansi pada loop.

Arus induksi menimbulkan gaya magnetic,  $\vec{F}_B$  yaitu

$$\vec{F}_B = I(\vec{l} \times \vec{B})$$

bekerja pada konduktor. Ini juga dapat dituliskan sebagai

$$F_B = IlB$$

$$F_B = \left( - \frac{Blv}{R} \right) lB = - \frac{B^2 l^2 v}{R}$$

Agar konduktor tetap bergerak dalam medan magnet seragam dengan kecepatan konstan, maka gaya luar,  $F_{luar}$  yang diberikan pada konduktor harus sama dengan gaya  $F_B$  tetapi dengan arah yang berlawanan. Karena itu

$$F_{luar} = \frac{B^2 l^2 v}{R}$$

Laju perubahan energy adalah daya

$$P = F_{eks} v = \left( \frac{B^2 l^2 v}{R} \right) v = \frac{B^2 l^2 v^2}{R}$$

Daya disipasi karena pemanasan joule diberikan oleh

$$P_{disipasi} = I^2 R = \left( - \frac{Blv}{R} \right)^2 R = \frac{B^2 l^2 v^2}{R}$$

Nampak bahwa daya yang diberikan dan daya disipasi sama.

### Medan Listrik Induksi

Untuk linstasan tertutup, kerja persatuan muatan diberikan oleh

$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Jika  $\vec{E}$  sejajar dengan  $d\vec{r}$

$$\varepsilon = \oint E dr \cos 0^\circ = \oint E dr$$

Jika laju perubahan fluks magnetic konstan, maka medan listrik induksi juga akan konstan. Jadi,

$$\varepsilon = E \oint dr = E(2\pi r)$$

Dengan menggunakan hukum Faraday,

$$\varepsilon = \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Maka diperoleh medan listrik induksi, yaitu

$$E(2\pi r) = \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$E = \frac{1}{2\pi r} \frac{d\Phi_B}{dt}$$

## Arus Eddy

Arus Eddy terbentuk ketika terjadi perubahan letak konduktor dalam sebuah medan magnet, baik itu konduktor yang bergerak dalam sebuah medan magnet yang tetap, maupun medan magnet yang berubah disekitar konduktor.

## Momen Dipol Magnetik

Medan magnet yang dihasilkan oleh arus dalam kumparan

Tinjau sebuah electron dengan muatan  $-q_e$  dalam atom bergerak melingkar dengan jari-jari  $r$  dan kelajuan  $v$ .

Gerak muatan ini ekuivalen dengan arus loop. Momen dipol magnet

$$\mu_l = IA$$

$$\mu_l = \left(-\frac{q_e}{T}\right)(\pi r^2) = -\frac{q_e \pi r^2}{\frac{2\pi r}{v}} = -\frac{1}{2} q_e v r$$

Persamaan ini dapat dituliskan sebagai

$$\mu_l = -\frac{q_e m_e v r}{2m_e}$$

Karena  $m_e v r = l$  adalah momentum angular orbital, maka diperoleh

$$\mu_l = -\left(\frac{q_e}{2m_e}\right)l$$

Dari sini nampak bahwa momen magnetic electron sebanding dengan momentum angular orbital, tetapi arahnya berlawanan.

Jika  $L$  adalah total momentum angular orbital, maka momen dipol magnet menjadi

$$\mu_L = -\left(\frac{q_e}{2m_e}\right)L$$

Dalam bentuk vector,

$$\vec{\mu}_L = -\left(\frac{q_e}{2m_e}\right)\vec{L}$$

## Momen Magnet Intrinsik

Analogi dengan gerak orbit, hubungan antara momentum angular intrinsik,  $\vec{S}$  dan momen dipol intrinsik,  $\vec{\mu}_S$ , untuk electron tunggal dituliskan sebagai

$$\vec{\mu}_S = -\left(\frac{q_e}{m_e}\right)\vec{S}$$

## Magneton Bohr

Secara makroskopik, sifat magnetic suatu material berasal dari momen-momen magnet yang berkaitan dengan electron-elektron individual. Electron-elektron ini memiliki momen magnet yang berasal dari orbit electron dan rotasi electron yang menghasilkan momen magnet spin. Momen magnetic dari gerak spin dan gerak orbital electron ini diungkapkan dalam bentuk magneton Bohr, yang dinotasikan dengan  $\mu_B$ , yaitu

$$\mu_B = \frac{q_e}{2m_e} \frac{h}{2\pi} = \frac{q_e h}{2\pi m_e} = 9,27 \times 10^{-24} \frac{\text{J}}{\text{T}}$$

dengan  $q_e = 1,602 \times 10^{-19}$  C adalah muatan electron;  $h = 6,626 \times 10^{-34}$  J.s adalah konstanta Planck; dan  $m_e = 9,109 \times 10^{-31}$  Kg adalah massa electron.

## Momen Magnet Total Atom

Momen magnet total  $\vec{\mu}$  dituliskan sebagai

$$\vec{\mu} = \vec{\mu}_L + \vec{\mu}_S = -\left(\frac{q_e}{2m_e}\right)\vec{L} - \left(\frac{q_e}{m_e}\right)\vec{S}$$

## Magnetisasi

Magnetisasi pada bahan umumnya bergantung pada medan magnetik, namun demikian ada sebagian kecil bahan yang dapat memiliki magnetisasi secara spontan tanpa kehadiran medan magnet luar.

Magnetisasi pada dasarnya adalah momen yang ditimbulkan oleh gerakan orbital spin elektron dan interaksi elektron tersebut dengan elektron-elektron lainnya.

Magnetisasi yang dimiliki oleh bahan dapat disebabkan oleh medan magnet luar yang mempengaruhinya sering disebut sebagai magnetisasi induksi, selain itu terdapat pula magnetisasi yang ada walaupun tanpa medan magnet luar yang dikenal sebagai magnetisasi remanen.

Jumlah momen dipol magnet per satuan volume disebut magnetisasi.

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{\mu}_i}{V}$$

Jika suatu material ditempatkan dalam medan magnetic seragam,  $\vec{B}_0$ , maka medan ini akan memagnetisasi material dan menyearahkan dipol magnetic pada material. Penyearahan dipol magnetic menghasilkan medan magnetic  $\vec{B}_M$ . Sehingga, medan magnet  $\vec{B}$  dituliskan menjadi

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

Hubungan antara  $\vec{B}_M$  dan  $\vec{M}$  adalah

$$\vec{B}_M = \mu_0 \vec{M}$$

Dengan  $\mu_0$  adalah permeabilitas ruang hampa. Karena itu,

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

Untuk kasus medan yang lemah,  $\vec{M}$  sebanding dengan medan  $\vec{B}_0$ , sehingga  $\vec{B}$  harus sebanding dengan  $\vec{B}_0$ .

$$\vec{B} = \kappa_m \vec{B}_0$$

Dengan  $\kappa_m$  adalah konstanta permeabilitas material/bahan. Karena itu, kita dapat menuliskan bahwa

$$\kappa_m \vec{B}_0 = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

$$\mu_0 \vec{M} = \vec{B}_0 (\kappa_m - 1)$$

## Klasifikasi Material Magnetik

Material magnetik adalah material yang mempunyai sifat magnetik. Sifat magnetik adalah fenomena suatu bahan menarik atau menolak material lain yang berada di dekatnya. Sifat magnetik dalam suatu material dapat dibedakan menjadi beberapa sifat yang meliputi: diamagnetik, paramagnetik, feromagnetik, ferimagnetik, dan antiferomagnetik. Semua material memperlihatkan paling tidak satu dari seluruh sifat kemagnetan yang ada dan sifat tersebut tergantung dari respon elektron dan dipol magnet atom terhadap pemberian medan magnet luar.

Tugas: Jelaskan perbedaan diamagnetik, paramagnetik, feromagnetik, ferimagnetik, dan antiferomagnetik.

## Pustaka

1. P.A. Tipler, G. Mosca, "Physics for Scientists and Engineers Sixth Edition with Modern Physics" Susan Finemore Brennan, New York, 2008.
2. D.C. Giancoli, "Physics: Principles with Applications, 7<sup>th</sup> Edition, vol. 1," Pearson, Boston, 2013.