

MATA KULIAH : FISIKA DASAR II
KODE MK : EL-122
Dosen : Dr. Budi Mulyanti, MSi

Pertemuan ke-9

CAKUPAN MATERI

1. HUKUM AMPERE
2. GAYA OLEH 2 KAWAT PARALEL
3. SOLENOIDA
4. TOROIDA
5. SIFAT-SIFAT MAGNETIK BAHAN

SUMBER-SUMBER:

1. Frederick Bueche & David L. Wallach, Technical Physics, 1994, New York, John Wiley & Sons, Inc
2. Tipler, Fisika Untuk sains dan Teknik (terjemah oleh Bambang Soegijono), Jakarta, Penerbit Erlangga, 1991
3. Gancoli Douglas C, Fisika 2 (terjemah), 2001, Penerbit Erlangga, Edisi 5.
4. Sears & Zemansky, Fisika Untuk Universitas 3 (Optika & Fisika Modern), 1991, Jakarta-New York, Yayasan Dana Buku Indonesia
5. Frederick J. Bueche, Seri Buku Schaum Fisika, 1989, Jakarta, Penerbit Erlangga
6. Halliday & Resnick, Fisika 2, 1990, Jakarta, Penerbit Erlangga
7. Sutrisno, Seri Fisika Dasar (Fisika Modern), 1989, Bandung, Penerbit ITB

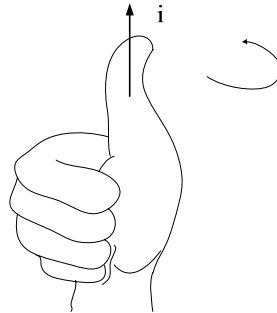
4.6 HUKUM AMPERE

Hubungan kuantitatif antara arus i dengan medan magnet \vec{B} :

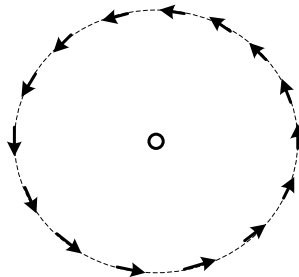
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 i ; \text{note } \oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Dikenal sebagai Hukum Ampere.

Aturan tangan kanan (*right-hand rule*) untuk menentukan arah \vec{B} disekitar kawat yang mengangkut arus i .



Arah \vec{B} berlawanan arah jarum jam



Arah \vec{B} disebelah kanan arus, \vec{B} ke atas disebelah kiri arus, \vec{B} ke bawah.

Arah arus keluar bidang gambar \vec{B} arahnya berlawanan arah jarum jam.

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

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

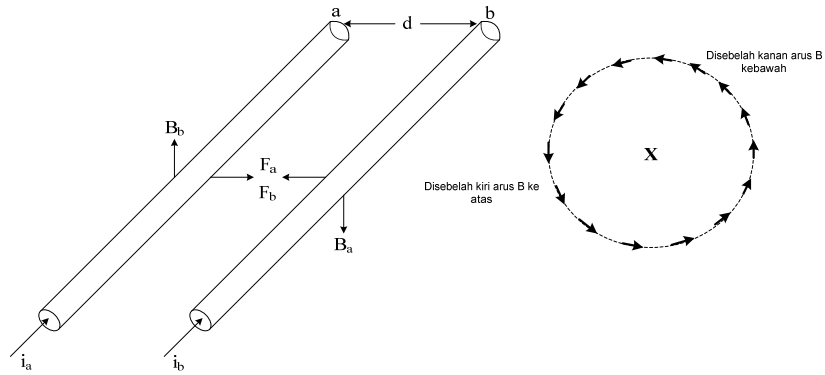
$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$$

μ_0 : konstanta permeabilitas = $4\pi \times 10^{-7}$ tesla.m/ampere (bukan momen dipol..!!!)

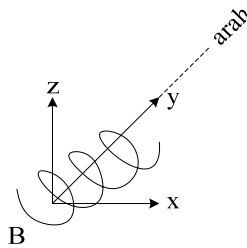
I. Medan magnet \vec{B} di dekat kawat panjang.

$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$ lintasan integrasi berbentuk lingkaran di dalam sebuah kawat

4.7 GAYA OLEH DUA KAWAT SEJAJAR



Medan magnet B_a yang ditimbulkan oleh arus $i_a \rightarrow B_a = \frac{\mu_0 i_a}{2\pi d}$ arahnya ke bawah



Menentukan arah F

$$\vec{F} = i\vec{\ell} \times \vec{B}; j \times -k = -i \text{ arah ke kiri}$$

Gaya yang dialami kawat b oleh medan a

$$\text{Besarnya } F_b = i_b \ell B_a = i_b \ell \frac{\mu_0 i_a}{2\pi d}$$

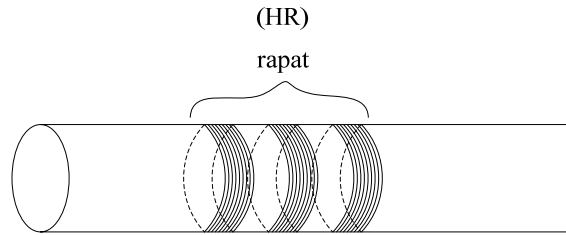
*Tinjau kawat a ; medan magnet B_b ditimbulkan oleh arus i_b ; arah B_b ke atas.

Sehingga F_a ke kanan, dan besarnya $F_a = i_a \ell B_b = i_a \ell \frac{\mu_0 i_b}{2\pi d}$ sama besar dengan F_b

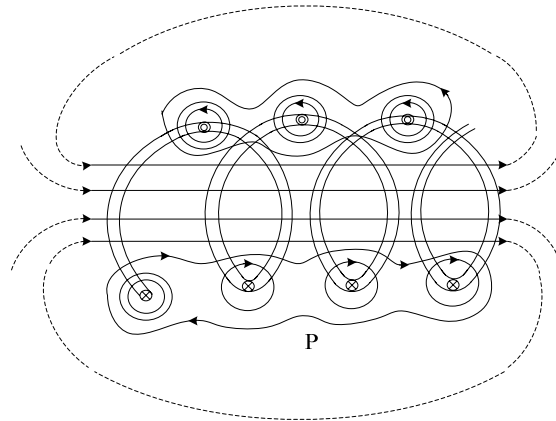
Arahnya saling tarik menarik.



4.8 SOLENOIDA

Solenoida adalah kawat panjang yang dililitkan di dalam sebuah helix yang terbungkus rapat dan yang mengangkut sebuah arus i .



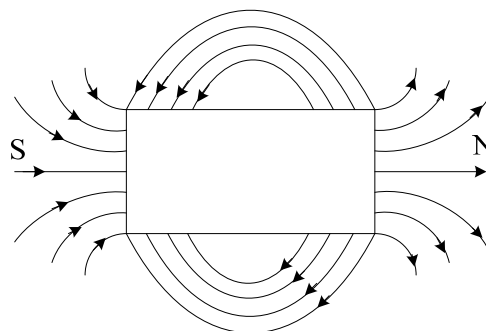
Sears : solenoida adalah lilitan kawat menjadi sebuah helix di sekeliling permukaan silinder yang berpenampang lingkaran.



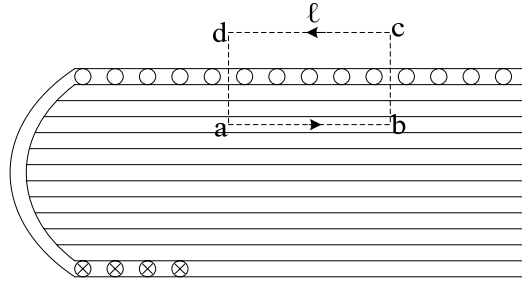
Untuk titik P : medan yang ditimbulkan oleh lilitan  (searah jarum jam) cenderung menghilangkan pengaruh oleh lilitan  (berlawanan arah jarum jam).

Untuk solenoida ideal, yaitu konfigurasi sebuah lembaran arus silinder yang panjangnya ∞ , maka $\vec{B} = 0$ (di titik-titik luar), misal di P.

Kalau digambarkan lagi untuk solenoida yang panjangnya berhingga,
N (utara) : ujung dimana garis *B* muncul keluar.
S (selatan) : ujung dimana garis *B* masuk



Untuk solenoida ideal :



Hukum Ampere :

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 i \rightarrow i = i_0(n\ell)$$

n : banyaknya lilitan persatuan panjang

ingat :

Lintasan integrasi mencakup lebih dari satu lilitan.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{\ell} + \int_b^c \vec{B} \cdot d\vec{\ell} + \int_c^d \vec{B} \cdot d\vec{\ell} + \int_d^a \vec{B} \cdot d\vec{\ell}$$

$B \cdot \ell$ 0, karena $\vec{B} \perp d\vec{\ell}$ 0, karena $\vec{B} = 0$ 0, karena $\vec{B} \perp d\vec{\ell}$

$$B = \mu_0 i_0 n$$

sedangkan flux magnetik $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$

Contoh :

Sebuah solenoida mempunyai panjang 1,0 m dan diameter dalam 3,0 cm. Solenoida tersebut mempunyai 5 lapisan lilitan yang masing-masing terdiri dari 850 lilitan dan mengangkut sebuah arus sebesar 0,5 A.

- a) Walaupun mempunyai 5 lapisan lilitan, tetapi karena diameter tidak berpengaruh terhadap B , maka :

$$B = \mu_0 i_0 n = (4\pi \times 10^{-7})(5)(5 \times 850)$$

untuk panjang 1 m mempunyai 5×850 lilitan

- b) Berapa flux magnet Φ_B ; $d = 3 \times 10^{-2} m$; $r = 1,5 \times 10^{-2} m$

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = B \cdot \pi r^2$$

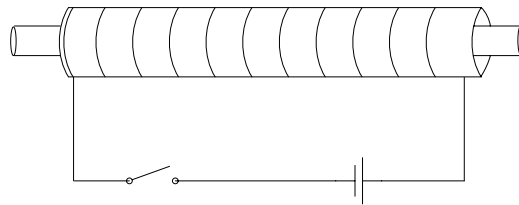
Arus netto i yang lewat melalui luas yang dibatasi oleh lintasan integrasi i_0 di dalam solenoida, karena lintasan integrasi mencakup lebih dari satu lilitan.

Solenoida tersebut menyediakan dasar pengertian yang baik untuk membicarakan Φ_B , yaitu fluks medan magnet \vec{B} . Kita telah membicarakan fluks Φ_E dari medan listrik \vec{E} dengan alasan yang ada kaitannya dengan hukum Gauss, yaitu fluks untuk permukaan tertutup.

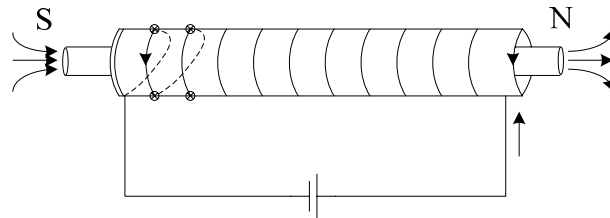
Dengan cara yang sama, kita dapat mendefinisikan fluks Φ_B untuk medan magnet \vec{B} untuk permukaan tertutup maupun terbuka :

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} ; \text{ satuan Wb} = \text{tesla m}^2$$

Elektromagnetik: terjadi jika solenoida mengitari inti besi.



Jika tidak ada arus melalui koil, inti dalam keadaan “mati”. Tidak ada medan magnet.



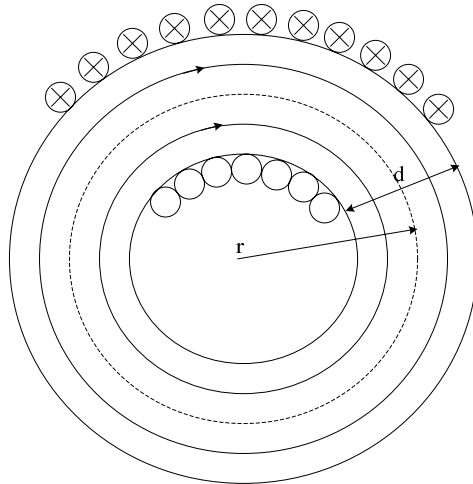
Jika ada arus koil dan inti berperan sebagai magnet kuat.

$\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{S} ; \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$ namun dalam fluks dapat juga didefinisikan untuk permukaan terbuka.

Contoh *device* yang menggunakan elektromagnetik adalah bel listrik.

4.9 TOROIDA

Adalah sebuah solenoida yang dibengkokkan menjadi bentuk donat. Bagaimana \vec{B} pada titik-titik dalam ?



Dari pertimbangan kesimetrian, maka garis-garis B akan membentuk lingkaran-lingkaran konsentris di dalam toroida tersebut.

Dengan Hukum Ampere :

Untuk menghitung B pada lintasan integrasi dengan radius r .

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

$$(B)(2\pi r) = \mu_0 i_0 N$$

$$B = \frac{\mu_0 i_0 N}{2\pi r}$$

B tidak konstan pada penampang sebuah toroida (bergantung pada jarak terhadap pusat toroida) \rightarrow bertentangan dengan solenoida.

$B = 0$ di titik-titik di luar toroida (ideal)

N = jumlah lilitan total

i_0 = arus di dalam lilitan toroida

Hukum Biot-Savart

Kelemahan Hukum Ampere untuk menghitung B dapat dilakukan jika distribusi arus adalah simetri. Ini sulit diterapkan untuk hal-hal praktis. Dalam elektrostatika, Hukum Gauss analog dengan Hukum Ampere. Misalnya Hukum Gauss tidak dapat dipakai untuk mencari \vec{E} dari dipole listrik.

Untuk menghitung \vec{E} yang ditimbulkan oleh distribusi muatan sembarang bagilah distribusi tersebut menjadi elemen-elemen muatan dengan Hukum Coulomb, diperoleh $d\vec{E}$ yang kemudian diintegrasikan untuk mencari \vec{E} .

Untuk menghitung \vec{B} pada setiap titik yang ditimbulkan oleh distribusi arus yang sembarang, kita bagi-bagi distribusi arus menjadi elemen-elemen arus, dan dengan Hukum Biot-Savart \rightarrow dapat dihitung $d\vec{B}$. Kemudian dengan mengintegrasikan kontribusi-kontribusi medan untuk seluruh distribusi \rightarrow diperoleh \vec{B} .

Secara skalar :

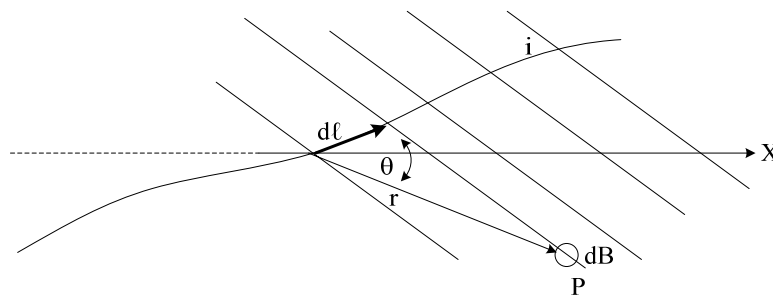
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{d\ell \sin \theta}{r^2}$$

$$\frac{\mu_0}{4\pi} = k'$$

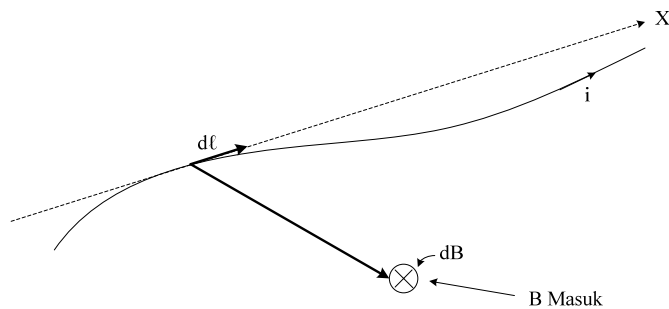
$$= 10^{-7} \text{WbA}^{-1}\text{m}$$

$$\boxed{d\vec{B} = k' I \frac{d\ell \sin \theta}{r^2}} ; d\vec{B} = k' \frac{I d\vec{\ell} \times \hat{r}}{r^2}$$

$$\Delta\vec{B} = k' I \frac{\Delta\vec{\ell} \times \hat{r}}{r^2}$$



Secara vektor :

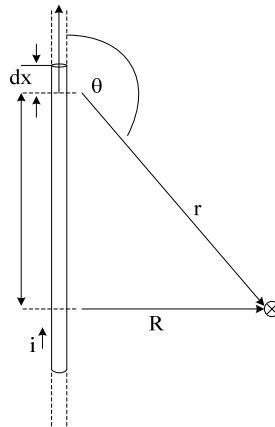


$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{\ell} \times \vec{r}}{r^3}$$

$$\vec{B} = \int d\vec{B}$$

Contoh :

1. Sebuah kawat lurus yang panjang.



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i dx \sin \theta}{4\pi r^2}$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_{x=-\infty}^{x=\infty} \frac{\sin \theta}{r^2} dx ; r^2 = x^2 + R^2$$

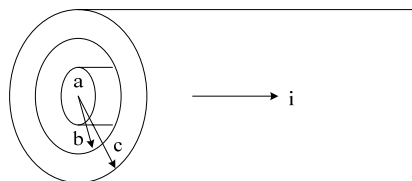
$$\sin \theta = \sin(\pi - \theta)$$

$$= \frac{R}{\sqrt{x^2 + R^2}}$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{R}{(x^2 + R^2)^{3/2}} dx$$

$$= \frac{\mu_0 i}{4\pi} \left(\frac{2}{R} \right) = \frac{\mu_0 i}{2\pi R}$$

2. Sebuah kabel koaksial (sesumbu)



medan magnet B di $r < a$

$$B = \frac{\mu_0 i r}{2\pi a^2}$$

medan magnet B di $a < r < b$

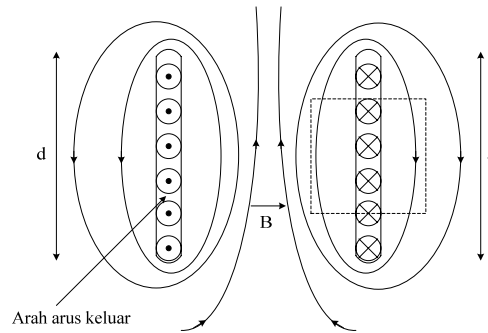
$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$$

medan magnet B di $b < r < c$

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \left(\frac{c^2 - r^2}{c^2 - b^2} \right)$$

medan magnet B di $r > c \rightarrow B = 0$

3. medan antara pelat paralel (penerapan Hukum Ampere)



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

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

$$B = \frac{\mu_0 I}{d}$$

4.10. SIFAT-SIFAT MAGNETIK BAHAN

Jika dua muatan terisolasi yang berlawanan ditempatkan berdekatan, maka keduanya membentuk dipol listrik yang dicirikan dengan momen dipol listrik \vec{P} .

Di dalam magnetisme/kemagnetan, kutub magnet yang terisolasi (monopol-monopol magnet) tidak ada. Bentuk yang paling sederhana adalah dipol magnet yang dicirikan dengan momen dipol magnet $\vec{\mu}$.

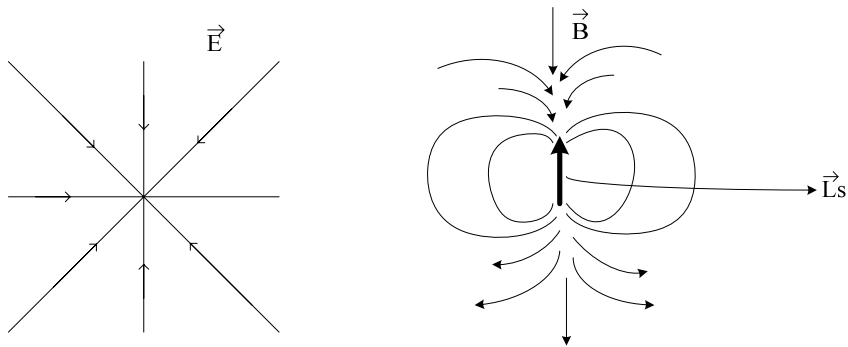
Sebuah loop arus, sebuah magnet batang dan sebuah solenoida yang panjangnya berhingga adalah contoh dipol magnet.

- Kita dapat menentukan kutub N dengan menggantungkannya dengan jarum kompas dan mengamati ujung mana yang menunjuk ke arah utara.
- Kita dapat menentukan momen dipol magnet dengan menempatkan dipol tersebut dalam medan magnet luar \vec{B} lalu mengukur momen torsinya; kemudian dapat diperoleh $\vec{\tau}$ dengan rumus $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$.

Jika kita memecahkan sebuah batangan magnet, maka pecahan-pecahan tersebut ternyata mirip dipol dan bukan mirip kutub-kutub yang terisolasi. Jika kita pecahkan lagi menjadi elektron, proton dan neutron yang membentuk atom-atom magnet, ternyata partikel-partikel elementer ini pun mirip dipol-dipol magnet.

Semua elektron mempunyai sebuah momentum sudut “*spin*” yang mirip karakteristik terhadap sebuah sumbu tertentu, yaitu sebesar :

$$L_s = 0,53 \times 10^{-34} Js$$



Sebuah muatan yang berputar (*spinning charge*) dapat dipandang secara klasik sebagai loop arus yang sangat kecil (*infinitesimal*). Setiap loop seperti itu adalah dipol magnet yang sangat kecil, dengan momen dipol magnet $\mu = NiA$

dimana i : arus ekuivalen di dalam masing-masing loop

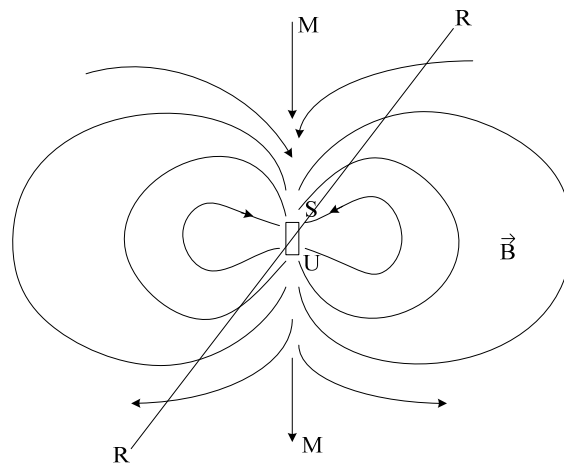
A : luas loop

N : banyaknya lilitan persatuan loop

Partikel dan inti yang momentum sudut *spin*-nya = 0 (partikel α , inti O^{16} dll) tidak mempunyai momen dipol magnet.

Kemagnetan Bumi

Sir William Gilbert (1544-1603) yang mula-mula menganggap bahwa bumi adalah sebuah magnet besar dengan kutub-kutub magnet dan sebuah katulistiwa magnet.



MM sebagai magnet Bumi

RR sebagai rotasi Bumi

MM dan RR dipisah oleh sudut 15°

Kutub magnet di dalam belahan Bumi utara berada di Canada Utara (*Arctic*), kutub utara tersebut mirip kutub selatan karena garis-garis \vec{B} menuju kutub tersebut. Di belahan Bumi selatan terdapat kutub magnet utara tepatnya berada di kutub selatan (*Antartica*). Tentu saja tidak ada magnet batang yang tertanamkan di pusat Bumi. Beberapa planet lain di dalam solar sistem misalnya Mercurius dan Jupiter juga mempunyai medan magnet. Juga galaksi kita Bimasakti/*Milky Way*.

Paramagnetism

Kemagnetan adalah cabang ilmu Fisika yang disebut *Ferromagnetism*. Paramagnetism adalah bentuk kemagnetan yang paling lemah. Ini terjadi karena atom atau ion mempunyai efek-efek magnetik elektron termasuk gerakan *spin* dan gerakan lintasan (orbital) nya, saling meniadakan satu sama lain. Misalnya gas-gas mulia seperti Ne, ion seperti Cu^{++} .

Jika kita menempatkan sampel bahan yang terdiri dari N atom, yang masing-masing mempunyai momen dipol magnet μ , di dalam sebuah medan magnet. Maka dipol-dipol atom elementer tersebut cenderung berbaris dalam arah medan magnet.

Kecenderungan menjajarkan diri ini disebut paramagnetism. Proses penjajaran ini terganggu oleh efek-efek agitasi termal. Jadi bahan paramagnetis memperoleh sebuah momen magnet bila ditempatkan di dalam sebuah medan magnet luar, tetapi momen $\mu \ll \mu_{\text{maks}}$.

Jika bahan paramagnetik ditempatkan di dalam medan magnet tidak uniform misal di dekat kutub magnet yang sangat kuat, maka baha tersebut akan ditarik ke arah daerah medan yang lebih tinggi yaitu kutub tersebut.

Dengan mengukur gaya magnet F_m , maka μ dapat ditentukan $\vec{F}_m = \vec{\mu} \left(\frac{dB}{dx} \right)_{\text{maks}}$ gradien sebuah medan magnet tidak uniform. magnetisasi M didefinisikan sebagai :

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

dimana V : volume bahan sampel.

Pada tahun 1895, Pierrri Curie menentukan secara experimental bahwa magnetisasi M dari suatu bahan paramagnetik berbanding lurus dengan \vec{B} (besar medan magnet dimana sampel ditempatkan) dan berbanding terbalik dengan temperatur :

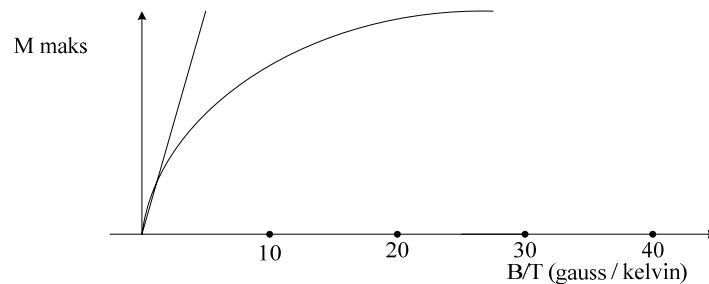
$$M = C \frac{B}{T} \quad (\text{Hukum Curie})$$

Secara fisis :

kenaikan \vec{B} cenderung menjajarkan dipol-dipol elemter dalam bahan, sedangkan kenaikan T mengganggu penjajaran ini. Hukum ini berlaku asalkan B/T tidak terlalu besar.

M tidak bisa naik terus menerus, tetapi dibatasi oleh nilai M_{maks} , yaitu $M_{maks} = \frac{\mu N}{V}$ dimana pada M_{maks} ini terjadi penjajaran total semua N dipol dalam volume V .

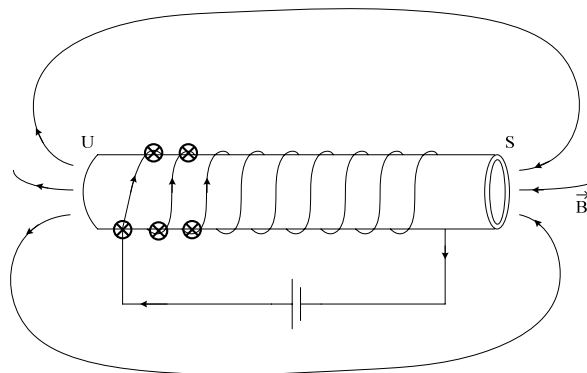
Perbandingan M/M_{maks} bahan paramagnetik



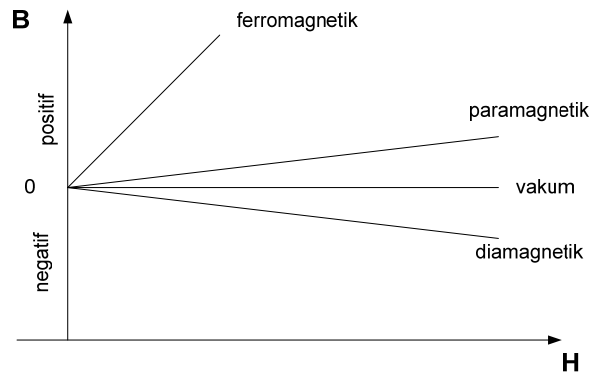
Diamagnetik

Pada tahun 1846 Michael Faraday menemukan bahan (dalam hal ini bismut) yang bila didekatkan ke kutub magnet yang kuat akan tertolak. Sifat diamagnetik ini sangat lemah sehingga sering diabaikan.

Pada umumnya material/bahan tidak tertarik kuat oleh magnet. Eksperimen dengan menggunakan solenoida dengan inti berupa vacuum dan kemudian diberi sampel bahan yang ingin diketahui sifat kemagnetannya.



Jika arus mengalir dalam kawat dan inti berupa vacuum, maka ada medan magnet sebesar, misal B_v . Jika inti diganti dengan sampel bahan, misal :



$$B = k_m B_v$$

Dimana k_m = permeabilitas relatif bahan

Untuk k_m sedikit lebih besar dari 1 → paramagnetik

Contoh : $k_m = 1,000021$ (Al padat)

Untuk k_m sedikit lebih kecil dari 1 → diamagnetik

Contoh : timah padat, $k_m = 0,999984$

Efek kedua macam bahan sangatlah kecil, sehingga dapat diabaikan.

Bahan Ferromagnetik, $k_m \gg 1$.

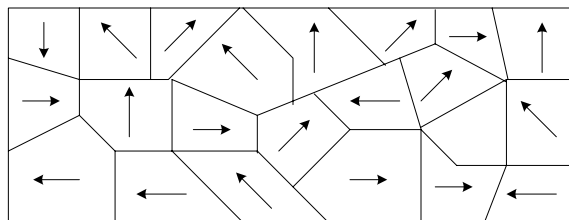
Contoh : *Fe, Ni, Co*

Bahan Ferromagnetik

Di dalam bahan terjadi kopling pertukaran (*exchange coupling*) diantara atom-atom yang berdekatan. Efek ini adalah efek kuantum, tidak dapat diterangkan dengan fisika klasik. Jika temperatur dinaikkan di atas temperatur kritis (atau temperatur Curie), maka kopling pertukaran tiba-tiba lenyap dan berubah menjadi paramagnetik.

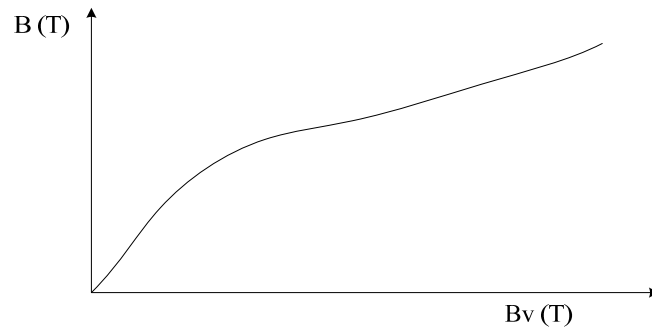
Contoh T_c untuk *Fe* → $T_c = 1043 K = 770^0C$; $N_i = 358^0C$

Atom-atom di dalam bahan ferromagnetik sangat kooperatif satu sama lain. Ada berjuta-juta dipol atom dalam suatu daerah yang saling kooperatif yang disebut domain, yaitu magnet-magnet kecil yang dibentuk oleh aksi kooperatif dari atom-atom dalam bahan ferromagnetik. Pada $t > t_c$, atom-atom tidak dapat berkooperatif, karena adanya energi termal yang mengakibatkan vibrasi atom merusak domain-domain.



Masing-masing domain berperan sebagai magnet-magnet kecil.

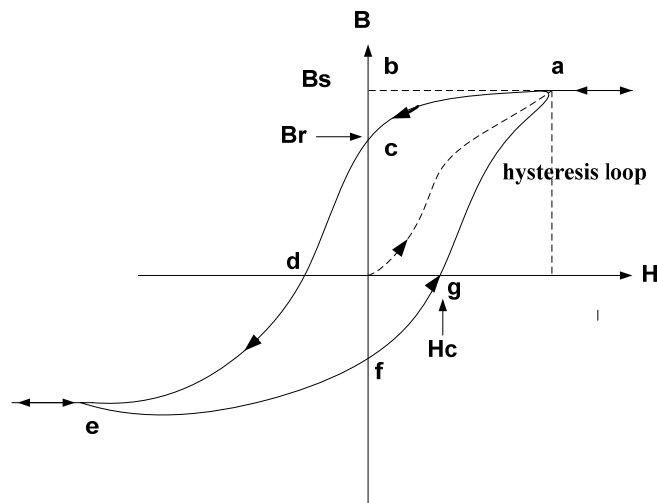
Magnetisasi akan lebih besar jika bahan ferromagnetik ditempatkan pada medan magnet yang lebih besar. Dengan eksperimen solenoida seperti di depan, arus dalam koil dinaikkan, sehingga B_v dan B naik. Dengan mengplot harga B dan B_v diperoleh kurva magnetisasi.



Kenaikkan B akan mencapai harga maksimal, yang disebut medan saturasi, dimana untuk besi terjadi pada $B = 1,8 T$. Pada titik ini hanya sekitar 1% medan total yang disebabkan arus dalam koil, selebihnya oleh efek magnetik dalam besi.

Magnet permanen dibuat dengan menempatkan besi dalam medan magnet. Meskipun pada solenoida tersebut, arus dimasukkan masing-masing domain tetap tersejajarkan, dengan kata lain besi termagnetisasi dan kemudian menjadi magnet permanen (sebenarnya untuk mensejajarkan pertama kali besi harus dipanaskan).

Namun dalam besi lunak domain-domain menjadi tidak teratur jika arus dimatikan. Mengapa orang memilih inti solenoida dibuat dari besi lunak ?. Hal ini karena ada kecenderungan menghasilkan fenomena histeresis.



Magnetisasi tidak otomatis menjadi nol, ketika medan diturunkan menjadi nol, domain-domain menunjukkan sifat seperti gesekan (*friksi*), domain-domain tetap berubah-

ubah, ini mengakibatkan panas hilang dalam bahan ferromagnetik ketika domain menjadi sejajar atau tidak sejajar.

Bergantung pada kegunaan bahan ferromagnetik bahan tersebut harus mempunyai sifat magnetik tertentu. Untuk tujuan tertentu harus mempunyai kurva kisteresis yang lebar, untuk yang lain diperlukan bahan yang tidak mempunyai sifat kisteresis. Ahli metalurgi telah mendisain alloy ferromagnetik yang dapat mempunyai sifat berbeda-beda, masing-masing dapat digunakan untuk aplikasi tertentu.

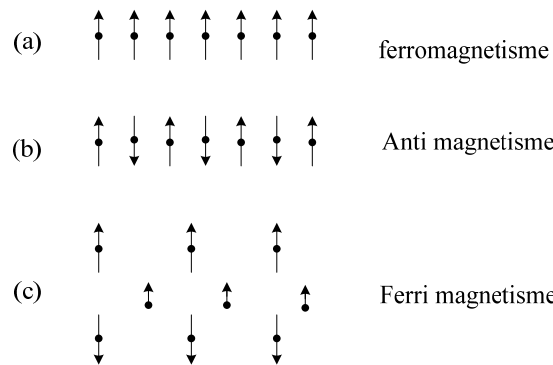
Dua jenis kemagnetan yang lain :

- Anti ferromagnetism
- Ferrimagnetism

Bahan anti-ferromagnetik, contoh MnO_2 . *Exchange coupling* bertugas mengunci ion-ion yang berdekatan ke dalam anti paralel yang kuat. Namun jika bahan dipanaskan melebihi temperatur Neel, maka *exchange coupling* tidak berfungsi. Sehingga bahan berubah menjadi paramagnetik.

Bahan ferrimagnetik, contoh : besi, ferrit, dimana terdapat dua macam ion magnetik yang berlawanan, yaitu Fe^{++} dan Fe^{+++} . *Exchange coupling* mengunci ion-ion ke dalam sebuah pola, dimana efek-efek luar mirip perantara diantara ferromagnetisme dan anti-ferromagnetisme. *Exchange coupling* juga lenyap jika bahan dipanaskan.

Orientasi dipol-dipol magnet oleh *exchange coupling*



SOAL-SOAL:

1. **Dari Sears.** Misalkan sebuah partikel yang memiliki massa, $m = 0,5 \text{ g}$ dan muatan sebesar $q = 2,5 \times 10^{-8} \text{ C}$, bergerak dengan kecepatan $v_0 = 6 \times 10^4 \text{ ms}^{-1}$ arah horizontal (timur)

Ditanya : \vec{B}_{min} agar partikel tetap bergerak dalam arah horizontal ?

2. Sebuah kawat tembaga:

$$D = 0,10 \text{ inch} = 0,10 \times 2,54 \times 10^{-2} \text{ m} = 2,54 \times 10^{-3} \text{ m}$$

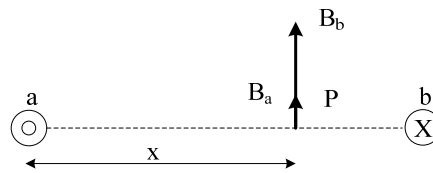
$$I = 50 \text{ A}$$

Ditanya: B pada permukaan kawat?

3. Bagaimana jika arus i_a menembus bidang gambar, tapi i_b keluar bidang gambar.

Buktikan gaya $F_a = F_b$ tolak menolak !

4. Dua kawat sejajar yang berjarak $d = 5 \text{ cm}$ mengangkut arus i dalam arah yang berlawanan. $i = 2 \text{ A}$. Carilah medan magnet untuk titik-titik diantara kedua kawat yang berjarak $x = 2 \text{ cm}$ dari salah satu kawat. !



B_a dan B_b arahnya ke atas.

$$B_a = \frac{\mu_0 i}{2\pi x}$$
$$B_b = \frac{\mu_0 i}{2\pi(d - x)}$$
$$B = B_a + B_b$$