

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1. Momen Dipol Magnet

Momen dipol magnet timbul apabila muatan listrik yang bergerak dalam lintasan. Besaran momen dipol magnet didefinisikan sebagai banyaknya muatan yang bergerak dalam suatu besaran luas yang dibuat lintasannya.

Dengan menganalogikan suatu dipol magnet pada suatu simpal arus sederhana dengan luas penampang  $A$  dan kuat arus  $i$ , maka momen dipol magnetnya dapat ditulis sebagai:

$$\mu = \frac{dq}{dt} A = i A \quad (2.1.1)$$

$$\text{dengan } i = \frac{e}{T} = \frac{\omega e}{2\pi}$$

dimana,  $T$  = Periode

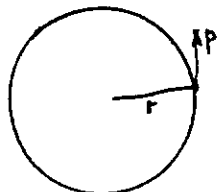
$e$  = Muatan elektron

Untuk elektron yang bergerak dengan lintasan yang berbentuk lingkaran, maka besarnya momen dipol magnet .

$$\begin{aligned} \mu_e &= \frac{e}{T} A = \frac{e\omega}{2\pi} \pi r^2 \\ &= \frac{e(\omega r) r}{2} = \frac{evr}{2} \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

dimana  $v$  = kecepatan elektron

## 2.2. Gerak Orbital



Apabila suatu elektron berputar, maka elektron tersebut akan memiliki momentum putar :

$$\begin{aligned}\vec{l} &= \vec{P} \times \vec{r} \\ &= m\vec{v} \times \vec{r} \\ &= mvr\hat{\mu}\end{aligned}$$

Perbandingan harga skalar dari momen dipol magnet dengan momentum dapat dituliskan

$$\begin{aligned}\frac{\mu_B}{l} &= \frac{evr/2}{r mv} = \frac{e}{2m} \\ &= \gamma \\ &= \text{Faktor giromagnetik}\end{aligned}\tag{2.2.1}$$

dengan,

$$\begin{aligned}e &= 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \\ m &= 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}\end{aligned}$$

Elektron, dalam atom, yang berbentuk elips disamping berputar pada lintasannya, elektron juga berputar pada sumbunya sendiri (berspin). Momentum putar elektron dapat dinyatakan dengan bilangan kuantum orbital (radial)  $l$  dan spin  $s$ , masing - masing juga memberikan momen magnetnya.

$$\vec{L} = l \hbar$$

$$\vec{S} = s \hbar$$

Untuk  $l = 0$ , lintasannya berbentuk lingkaran .

Hubungan momen dipol magnet dengan momentum putar dapat dituliskan :

$$\begin{aligned}\bar{\mu}_l &= \frac{e}{2m} \bar{L} = \frac{e \hbar}{2m} \bar{l} \\ &= g_l \bar{l} \mu_B \\ \mu_B &= \frac{e\hbar}{2m} = 1 \text{ magneton bohr} \quad (2.2.2)\end{aligned}$$

$g_l = 1$ , disebut faktor Lande

Elektron yang berputar pada sumbunya juga dapat menimbulkan momen dipol magnet yang dapat didefinisikan :

$$\bar{\mu}_s = g_s \bar{s} \mu_B \quad (2.2.3)$$

Karena momentum orbital dan spin menyusun membentuk momentum putar  $\bar{j}$ , maka momen dipol magnetnya menyusun membentuk momen dipol magnet total.

$$\begin{aligned}\bar{\mu}_j &= \bar{\mu}_l + \bar{\mu}_s \\ &= g_l \bar{l} \mu_B + g_s \bar{s} \mu_B \\ &= (g_l \bar{l} + g_s \bar{s}) \mu_B \quad (2.2.4)\end{aligned}$$

Momentum putar total  $\bar{j} = \bar{l} + \bar{s}$

Apabila  $g_s = 2g_l$ , maka  $\bar{\mu}_j$  tidak sejajar  $\bar{j}$ .

Proyeksi  $\bar{\mu}$  pada  $\bar{j}$  merupakan momen dipol magnet efektif (karena  $\bar{\mu}$  berinteraksi dengan  $B$  dari atom yang arahnya sejajar dengan  $\bar{j}$ ).

$$\bar{\mu}_{j\text{ef}} = \left[ \bar{\mu}_j \cdot \frac{\bar{j}}{j} \right] \frac{\bar{j}}{j} \quad (2.2.5)$$

Dapat dituliskan  $\mu_{j\text{ef}} = g_j \bar{j} \mu_B$

$$\bar{\mu}_{j\text{ef}} = \left[ (g_l \bar{l} + g_s \bar{s}) \frac{\bar{j}}{j} \right] \frac{\bar{j}}{j} \mu_B$$

$$\begin{aligned}
&= \left[ (\bar{l} + 2\bar{s}) \frac{\bar{j}}{j} \right] \frac{\bar{j}}{j} \mu_B \\
&= \left[ (\bar{l} + \bar{s} + \bar{s}) \frac{\bar{j}}{j} \right] \frac{\bar{j}}{j} \mu_B \\
&= \left[ (\bar{j} + \bar{s}) \frac{\bar{j}}{j} \right] \frac{\bar{j}}{j} \mu_B \\
&= \left[ \bar{j} \frac{\bar{j}}{j} + \bar{s} \frac{\bar{j}}{j} \right] \frac{\bar{j}}{j} \mu_B
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\bar{j} &= \bar{l} + \bar{s} & \bar{l} \cdot \bar{l} &= \bar{j} \cdot \bar{j} + \bar{s} \cdot \bar{s} - 2\bar{j}\bar{s} \\
\bar{l} &= \bar{j} - \bar{s} & \bar{l}^2 &= \bar{j}^2 + \bar{s}^2 - 2\bar{j}\bar{s}
\end{aligned}$$

$$\bar{j} \cdot \bar{s} = \frac{j^2 + s^2 - l^2}{2}$$

$$\mu_{j\bar{j}} = \left[ j^2 + \frac{j^2 + s^2 - l^2}{2} \right] \frac{\bar{j}}{j} \mu_B$$

$$= \left[ 1 + \frac{j^2 + s^2 - l^2}{2j^2} \right] \frac{\bar{j}}{j} \mu_B \quad (2.2.6)$$

Sehingga harga dari faktor Lande untuk  $j$  :

$$g_j = \frac{1 + \frac{j^2 + s^2 - l^2}{2j^2}}{2j^2} \quad (2.2.7)$$

Dari sini nilai eigen dari faktor Lande dapat dituliskan:

$$g_j = 1 + \frac{j(j+1) + s(s+1) - l(l+1)}{2j(j+1)} \quad (2.2.8)$$

Semua elektron dalam sebuah atom memiliki harga momentum putar dan momen dipol magnetnya sendiri-sendiri. Momen dipol magnet elektron akan saling berpasangan, ini ditunjukkan oleh harga  $m_l$  dan  $m_s$  yang bertanda positif, berpasangan dengan negatifnya. Oleh adanya pasangan-pasangan momen dipol magnet ini, elektron saling berikatan sehingga menjadi stabil tetap dalam ikatannya.

Apabila suatu atom ternyata ada satu atau lebih elektron tidak mempunyai pasangan momen dipol magnetnya, dia tidak akan dapat berdiri sendiri, tetapi akan mencari pasangan untuk menjadi stabil.

Pasangan momen dipol magnet ini dapat dari atom yang sejenis atau dapat pula dari jenis yang lain.

Sebagai contoh atom hidrogen H yang hanya mempunyai satu elektron, maka atom ini tidak mampu berdiri sendiri, tetapi selalu berikatan, antara lain dengan atom sejenis H dengan membentuk molekul  $H_2$ , atau dengan atom yang tidak sejenis misalnya atom O membentuk molekul  $H_2O$ , atau dengan atom - atom jenis lainnya seperti C, S, N atau yang lainnya.

Ikatan dari momen dipol magnet ini ada yang kuat ada pula yang lemah, tergantung jarak antara keduanya. Untuk ikatan yang lemah, dapat dengan mudah dilepaskan ikatannya dengan memberikan gangguan dari luar, misalnya dengan medan magnet, maka ikatannya akan lepas dan masing-masing momen dipol magnet akan berinteraksi dengan medan magnet tersebut.

Jika atom dengan momen dipol  $\mu$  berada dalam medan magnet  $B$  maka akan terjadi interaksi antara momen dipol dengan medan magnet yang dirumuskan :

$$E = - \bar{\mu} \cdot \bar{B} \quad (2.2.9)$$

Atom yang mempunyai momen dipol magnet  $\mu$  dalam medan magnet  $B$ , momen dipol magnet tersebut akan berpresisi terhadap  $B$  karena adanya momen gaya

$$\bar{M} = \bar{\mu} \times \bar{B} \quad (2.2.10)$$

Besarnya frekuensi presisi ini dapat dihitung berdasarkan mekanika klasik (berhubungan antara momen gaya dengan momentum putar)

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\mu}{e h} B \\ &= \gamma B \end{aligned} \quad (2.2.11)$$

(Anwar Dhani, 1981)

### 2.3. Induksi Magnet.

Muatan yang bergerak akan menimbulkan medan magnet, sedangkan medan magnet ini akan melakukan gaya terhadap muatan lain yang bergerak dalam medan magnet tersebut.

Jadi suatu titik dikatakan ada medan magnet apabila muatan listrik yang bergerak pada di titik tersebut mengalami medan magnet. Besaran medan magnet ini yang induksi magnet yang disimbulkan  $B$  (Weber/m<sup>2</sup>)

Biot dan Savart menyatakan bahwa induksi magnet  $\bar{dB}$  yang dihasilkan di  $P$  oleh elemen kawat  $d\bar{S}$  yang berarus listrik  $i$  mempunyai sifat-sifat sebagai berikut:

1.  $\vec{dB}$  tegak lurus terhadap  $\vec{dS}$  maupun vektor satuan  $\hat{r}$  yang arahnya dari elemen  $dS$  ke  $P$ .
2.  $[\vec{dB}]$  berbanding terbalik dengan  $r^2$ , yaitu kuadrat yang dihitung dari elemen  $dS$  ke titik  $P$ .
3.  $[\vec{dB}]$  berbanding lurus dengan  $i$  dan panjang elemen  $[dS]$ .
4.  $[\vec{dB}]$  berbanding lurus dengan  $\sin \theta$ , yaitu sinus sudut yang dibentuk oleh  $\vec{dS}$  dan  $\hat{r}$ .

Secara matematis, hukum Biot-Savart dapat dituliskan :

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

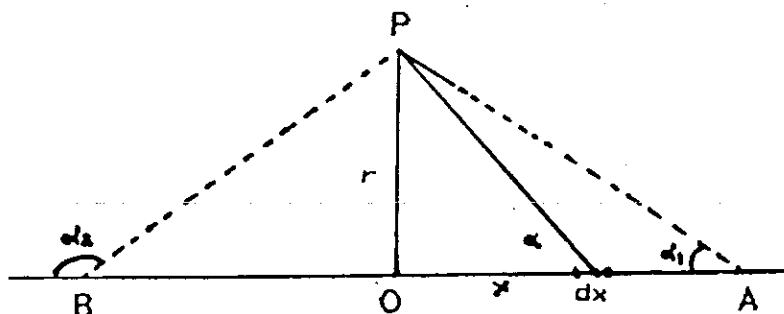
$$[\vec{dB}] = \frac{\mu_0 i dS \sin \theta}{4\pi r^2} \quad (2.3.1)$$

dengan  $\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7}$  tetapan perbandingan,  $\mu_0 =$  permeabilitas ruang hampa.

Medan magnet dapat dilukiskan dengan garis-garis yang dinamakan garis-garis induksi magnet, yaitu garis yang arah garis singgung pada setiap titiknya yang menyatakan arah induksi magnet di titik tersebut.

### 2.3.1. Induksi Magnet Pada Kawat Berarus.

Sebuah kawat berarus yang panjangnya  $AB$ . maka besarnya induksi magnet pada titik  $P$  yang berjarak  $r$  dari kawat adalah :



Gambar 2.1. Induksi pada kawat lurus

Dengan menggunakan persamaan 2.3.1, maka akan diperoleh besarnya induksi magnet pada titik P :

$$\vec{B} = - \frac{\mu_0 i}{4\pi r} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha \, d\alpha$$

$$\vec{B} = - \frac{\mu_0 i}{4\pi r} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (2.3.2)$$

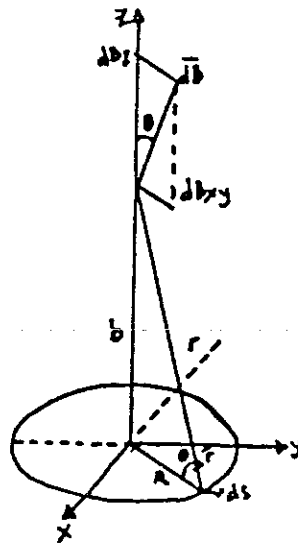
Untuk kawat yang panjang tak berhingga, maka  $\alpha_1 = 0$  dan  $\alpha_2 = \pi$ , sehingga  $\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 = 2$

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

### 2.3.2. Induksi Magnet Pada Kawat lingkaran Berarus.

Suatu kawat berbentuk lingkaran dengan jari-jari R terletak pada bidang xy dan dialiri arus i, akan dihitung induksi magnet B pada suatu titik pada sumbu lingkaran yang berjarak b dari pusat lingkaran.





Gambar 2.2. Induksi magnet pada kawat lingkaran berarus

Dari gambar di atas terlihat bahwa setiap elemen  $i dS$  selalu tegak lurus terhadap  $r$ , sehingga besar induksi magnet yang ditimbulkan di P dapat dinyatakan dengan :

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{|dS \times r|}{r^2} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{dS}{(R^2 + b^2)} \quad (2.3.3)$$

dengan arah  $dB$  membentuk sudut  $\theta$  terhadap sumbu  $z$ . Sifat simetri dari lingkaran terhadap sumbu  $z$  menyebabkan setiap komponen  $dB$  yang sejajar bidang  $xy$  secara berpasangan saling meniadakan, sehingga ada hanya komponen  $dB$  dalam arah sumbu  $z$  saja. yaitu :

$$d\bar{B}_z = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{dS \cos \theta}{(R^2 + b^2)} \hat{k}$$

Induksi total magnet di P secara keseluruhan adalah:

$$\begin{aligned}
 \vec{B} &= \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{\cos \theta}{(R^2 + b^2)} \hat{k} \, ds \\
 &= \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{\cos \theta \, 2\pi R}{(R^2 + b^2)} \hat{k} \\
 &= \frac{\mu_0 i}{2} \frac{\cos \theta \, R^2}{(R^2 + b^2)^{3/2}} \hat{k} \quad (2.3.4)
 \end{aligned}$$

Apabila P terletak pada pusat lingkaran, maka :

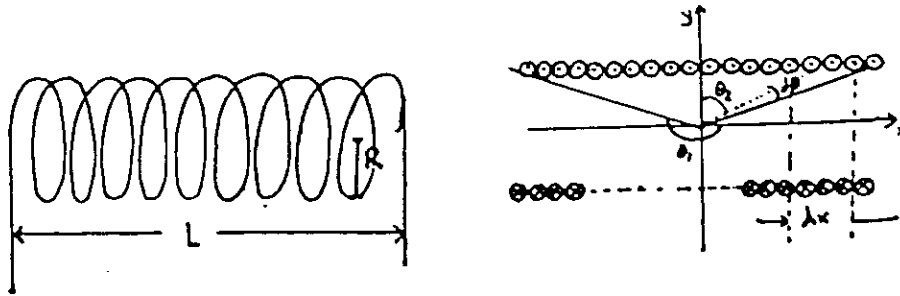
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{2R} \hat{k} \quad (2.3.5)$$

Untuk  $b \gg R$ , dari persamaan (2.3.4)

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i R^2}{2b^3} \hat{k} \quad (2.3.6)$$

### 2.3.3. Induksi Magnet Pada Solenoida

Solenoida adalah gulungan kawat berarus dengan penampang lingkaran yang luasnya sama dan membentuk selubung lingkaran silinder, apabila solenoida dengan  $N$  lilitan dan panjang  $L$ , jari-jari  $R$  yang dialiri arus  $i$ , berarti jumlah lilitan per satuan panjang =  $n = N/L$ , sedangkan  $n \times$  arus =  $n i$  dinamakan lilitan ampere, maka besarnya induksi magnet pada titik P yang terletak pada sumbu solenoida dapat diketahui.



Gambar 2.3. (a). Gambar solenoida

(b). Gambar skema penampang solenoida

Dengan memisalkan sumbu solenoida sebagai sumbu  $x$  dengan titik  $P$  sebagai pusatnya. Ditinjau elemen solenoida yang berjarak  $x$  dari  $Y$  setebal  $dx$ . Induksi magnet di  $P$  oleh elemen tersebut adalah :

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \frac{N i dx}{L} \hat{i} \quad (2.3.7)$$

Dari gambar 2.3. tampak bahwa  $x = R \operatorname{tg} \theta$ , sehingga  $dx = R \sec^2 \theta d\theta$ .

Substitusikan ke persamaan 2.3.7, sehingga diperoleh:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 N i}{2 L} \cos \theta d\theta \hat{i} \quad (2.3.8)$$

Induksi magnet total di  $P$  diperoleh dengan mengintegrasikan persamaan 2.3.8 dari  $\theta = \theta_1$  hingga  $\theta = \theta_2$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 N i}{2 L} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta d\theta \hat{i}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 N i}{2 L} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \hat{i}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 n i}{2} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \hat{i} \quad (2.3.9)$$

Apabila solenoida panjang tak terhingga dan  $L \gg R$  dan  $P$  di tengah solenoida, maka  $\theta_1 = 270^\circ$  dan  $\theta_2 = 90^\circ$ , sehingga :

$$\vec{B} = \mu_0 i n \hat{i} \quad (2.3.10)$$

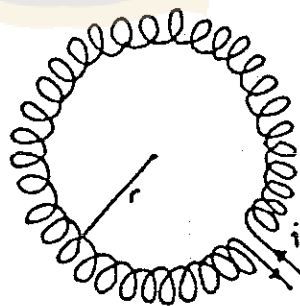
Bila  $P$  terletak pada salah satu ujung sumbu solenoida maka:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i n}{2} \hat{i} \quad (2.3.11)$$

Jadi  $B$  di ujung solenoida yang sangat panjang ( $L \gg R$ ), sama dengan  $\frac{1}{2}B$  di tengah solenoida

#### 2.3.4. Induksi Magnet Pada Toroida

Toroida adalah solenoida yang sumbunya berbentuk lingkaran.



Gambar 2.4. Toroida

Pada prinsipnya toroida merupakan selenoida yang dibengkokkan membentuk lingkaran, sehingga besarnya induksi magnetnya adalah:

$$H = \frac{\mu_0 i N}{L}$$

dengan  $L =$  keliling lingkaran  $= 2\pi a$

$$B = \frac{\mu_0 i N}{2\pi a} \quad (2.3.12)$$

#### 2.4. Fluks Magnet.

Dalam suatu ruang garis-garis gaya magnet yang rapatnya  $\vec{B}$  tiap  $m^2$ , maka  $B$  adalah jumlah garis gaya yang melalui  $A$ ,  $B$  selain disebut sebagai medan induksi magnet juga rapat fluks magnet. Jadi fluks magnet adalah besarnya rapat fluks magnet yang menembus suatu bidang. Secara matematis didefinisikan :

$$d\phi = \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.4.1)$$

Secara umum, bila  $B$  bervariasi dari satu titik ke titik yang lain, maka:

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.4.2)$$

Faraday telah merumuskan hubungan antara ggl induksi dengan fluks magnet. Perumusan ini dikenal dengan hukum Farraday yang menyatakan bahwa besar ggl induksi suatu kumparan sama dengan laju perubahan fluks magnet yang

melalui kumparan tiap waktunya. Secara matematis hukum faraday dituliskan :

$$\xi = - N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.4.3)$$

dengan  $N$  = banyak lilitan

$d\phi$  = perubahan fluks magnet

$dt$  = perubahan waktu

tanda negatif merupakan persesuaian arah pada hukum lenz.

Arus listrik yang mengalir selalu diikuti dengan timbulnya medan magnet, dan apabila suatu konduktor dimasukkan kedalam medan magnet maka konduktor tersebut akan dialiri arus induksi di dalamnya sekaligus konduktor tersebut mengalami magnetisasi.

Apabila arus listrik yang mengalir adalah arus AC, karena arus AC selalu mengalami perubahan fase gelombang, maka akan menyebabkan fluks magnet yang berubah-ubah sehingga akan menimbulkan garis gaya listrik sebesar:

$$\xi = - N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.4.4)$$

dengan  $N_1$  = banyak lilitan pertama

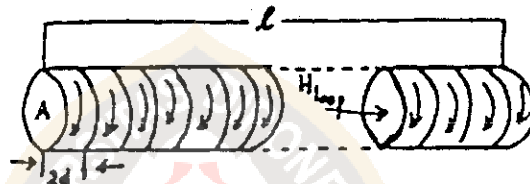
Dan jika konduktor yang telah diberi medan magnet, pada bagian lainnya diberi suatu kumparan, maka pada ujung-ujung kumparan tersebut juga akan terjadi induksi ggl sebesar:

$$\xi = - N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.4.5)$$

dengan  $N_2$  = banyak lilitan kedua

### 2.5. Magnetisasi.

Suatu benda yang ditempatkan dalam medan magnet  $H$ , maka benda tersebut akan terimbas sesuai dengan medan magnet tersebut, sehingga mengakibatkan pada benda tersebut akan timbul medan magnet yang disebut magnetisasi yang dilambangkan  $M$ , sehingga mengakibatkan semakin meningkatnya medan magnet. Besarnya magnetisasi  $M$  merupakan jumlah momen dipol magnet dalam satuan volume.



Gambar 2.5. Selenoida

Bila sebuah selenoida yang panjangnya  $l$  dengan volume  $v$ , mengandung lilitan sebanyak  $N$  lilitan, yang dialiri arus  $I$  dan memiliki lebar  $2d$ , maka besarnya magnetisasi ditunjukkan :

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{\sum P_m}{v} \\
 &= \frac{(I A) N}{v} \\
 &= \frac{I A N}{A l} = \frac{I l}{l 2 d}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{I}{2d} \quad \text{A/m} \quad (2.5.1)$$

Besarnya medan magnet di dalam solenoida adalah

$$H_{\text{loop}} = \frac{N I}{l} = \frac{I}{2d} = M \quad \text{A/m} \quad (2.5.2)$$

(Wang, 1966)

Maka besarnya medan magnet total merupakan jumlah dari medan magnet benda dan medan magnet utama.

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 (H + H_{\text{loop}}) \\ &= \mu_0 (H + M) \quad \text{Weber/m}^2 \end{aligned} \quad (2.5.3)$$

Besarnya magnetisasi  $M$ , berbanding langsung dengan besarnya  $H$ .

$$\bar{M} = \chi_m \bar{H} \quad (2.5.4)$$

Dengan  $\chi_m$  adalah suseptibilitas magnet

(Johannes, 1970)

## 2.6. Intensitas magnet

Apabila suatu benda magnetik diletakkan dalam daerah medan magnet, maka benda magnet tersebut akan termagnetisasi akibat dari adanya medan magnet. Besarnya intensitas magnet akan sebanding dengan kuat dan arah medan yang menginduksi. Besarnya intensitas magnet



didefinisikan sebagai besarnya momen magnetik persatuan volume.

$$i = \frac{M}{v} \quad (2.6)$$

dengan :

$i$  = intensitas magnet

$v$  = volume dari benda

Apabila besarnya intensitas magnetik ( $i$ ) adalah konstan serta mempunyai arah yang sama dimana - mana, maka benda magnetik tersebut mengalami magnetisasi secara menyeluruh.

#### 2.7. Pengaruh Suhu Terhadap Magnetisasi Benda Magnet.

Benda yang diletakkan dalam medan magnet luar akan mengalami magnetisasi, yang akan semakin meningkat sesuai dengan semakin meningkatnya medan magnet luar yang mempengaruhi hingga sampai pada titik jenuhnya, hal ini akan dibahas pada bagian lain.

Peningkatan suhu pada benda akan berakibat energi termal benda akan mengacaukan momen dipol sehingga berakibat akan menurunkan kemagnetan benda tersebut, ketika suhu mendekati temperatur currie kemagnetan benda akan semakin terus menurun, sampai tercapai kemagnetan berharga nol pada saat suhu mencapai suhu currie.

Pada penelitian yang telah dilakukan besarnya penurunan magnetisasi persamaan :

$$M \approx (T_c - T)^\beta \quad (2.7)$$

dengan  $\beta$  = eksponen titik kritis (antara 0,33 - 0,37)

(Shan Lue. C , 1994)

## 2.8. Klasifikasi bahan-bahan magnetik.

Secara garis besar bahan-bahan magnetik secara umum dapat kita klasifikasikan menjadi beberapa jenis:

- Diamagnetik
- Paramagnetik
- Ferromagnetik
- Antiferromagnetik
- Ferrimagnetik

Suatu bahan magnetik dapat diklasifikasikan diamagnetik, paramagnetik, ferromagnetik, antiferromagnetik atau ferrimagnetik tergantung pada bagaimana mekanisme orientasi momen dipol-momen dipol magnet di dalam bahan tersebut (Wang, 1966)

### 2.8.1. Diamagnetik.

Pada zat diamagnetik, tidak memiliki momen dipol magnet yang permanen, maka dari itu efek magnetiknya sangat lemah, dan momen magnetiknya terinduksi selalu berlawanan dengan arah medan.

Dalam teori atom klasik diterangkan bahwa suatu atom tersusun dari muatan positif pada pusat, dan dikelilingi

oleh elektron-elektron yang bermuatan negatif. Elektron-elektron ini bergerak pada orbitnya, sehingga timbul momen dipol magnet sederhana dengan suatu momen magnet tertentu. Apabila pada saat elektron ini berputar ini ditempatkan di dalam daerah yang mengandung medan magnet, maka elektron tersebut akan mendapat gaya tambahan akibat pengaruh dari medan magnet tersebut.

Gaya ini berhubungan dengan gaya Lorentz, didefinisikan sebagai:

$$\begin{aligned}\bar{F} &= e \bar{v} \times \bar{B} \\ &= \mu_0 e \bar{v} \times \bar{H}\end{aligned}\quad (2.8.1)$$

dengan  $v$  = kecepatan gerak elektron

Akibat adanya medan magnet dari luar, menyebabkan adanya gaya tambahan yang bekerja pada elektron tersebut yang berakibat elektron berputar semakin cepat, berarti elektron mempunyai frekuensi baru. Apabila  $\omega_1$  merupakan frekuensi sudut setelah mendapat pengaruh medan magnet dan  $\omega_0$  adalah kecepatan sudut sebelum mendapat pengaruh medan magnet, maka gaya sentripetal yang bereaksi pada elektron tersebut adalah :

$$m \omega_1^2 r - m \omega_0^2 r = \mu_0 e v H \quad (2.8.2)$$

Semakin meningkatnya frekuensi rotasi, maka akan berakibat semakin meningkat pula arusnya. Maka apabila ada

sekian  $Y$  elektron didalam di dalam suatu atom atau molekul, maka arus tambahan tersebut di dalam suatu atom besarnya :

$$I = \frac{-Y e \mu_o^2}{4 \pi m} \quad (2.8.3)$$

Sehingga bila dikalikan persamaan  $\mu = i A$ , maka kita akan memperoleh persamaan :

$$\langle \mu \rangle = - \frac{Y e^2 \mu_o H}{4 m} \langle a^2 \rangle \quad (2.8.4)$$

Dengan  $a$  merupakan jari-jari proyeksi lingkaran arus pada bidang yang tegak lurus dengan kuat medan magnet.

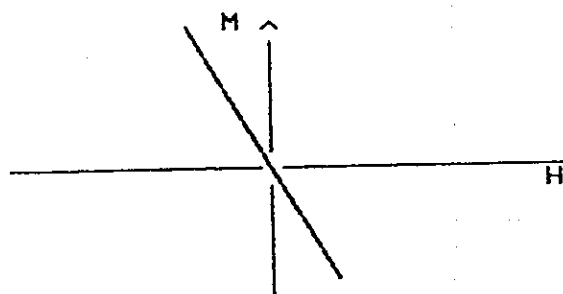
Sedangkan besarnya magnetisasi yang timbul dalam bahan dapat dirumuskan sebagai :

$$M = - \frac{N Y e^2 \mu_o H}{4 \pi \langle a^2 \rangle} \quad (2.8.5)$$

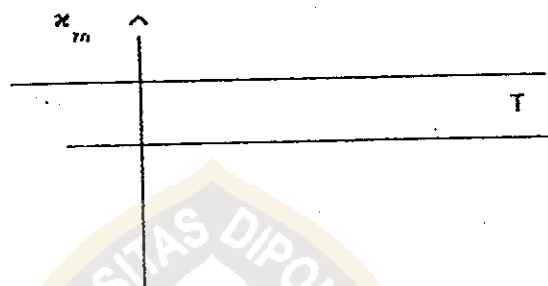
Sedangkan bila kuadrat jari-jari elektron dilambangkan dengan  $\langle a^2 \rangle$ , maka akan kita peroleh  $\langle a^2 \rangle = 2/3 \langle r^2 \rangle$ . Maka persamaan di atas dapat pula kita tuliskan

$$M = - \frac{N Y e^2 \mu_o H}{6 m \langle r^2 \rangle} \quad (2.8.6)$$

Disamping itu nilai magnetisasi tidak tergantung oleh temperatur, seperti terlihat pada gambar di bawah ini



Dambar : 2.6.  
Hubungan antara  $M$  dan  $H$  pada bahan diamagnetik



Dambar : 2.7  
Hubungan antara  $\chi_m$  dan  $T$  bahan diamagnetik

Dibawah ini beberapa contoh dari bahan yang dikategorikan bahan diamagnetik, antara lain : gips, marmer, bismuth, kuarsa, grafit serta garam - garam yang tidak berasal dari unsur lantanida dan unsur - unsur transisi.

### 2.8.2. Paramagnetik

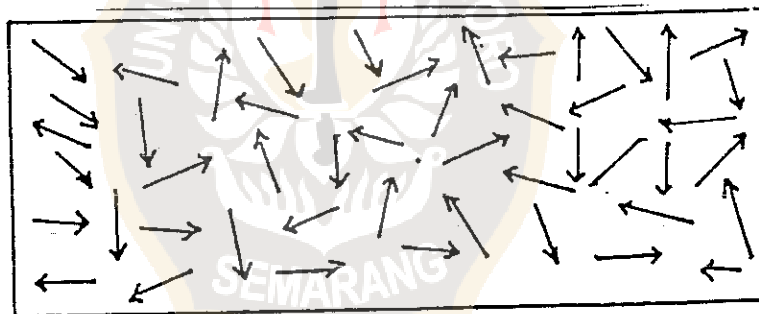
Pada zat-zat paramagnetik ditandai dengan terdapatnya kulit elektron terluar yang belum jenuh, maksudnya masih ada elektron yang spinnya tidak berpasangan dan mengarah pada arah spin yang sama. Pada bahan paramagnetik interaksi antara momen dipol-momen dipol magnetik atom

yang berdekatan sangat kecil sehingga dapat diabaikan. Tanpa medan magnet luar momen dipol magnetik bahan menjadi nol, hal tersebut dikarenakan adanya distribusi acak momen dipol - momen dipol tersebut akibat agitasi termal.

Apabila pada bahan paramagnetik diberikan medan magnet luar, maka momen dipol-momen dipol tersebut cenderung sejajar dan searah dengan medan magnet luar yang mempengaruhinya. Terjadinya keadaan sejajar tersebut berkaitan dengan adanya energi interaksi terendah antara  $\mu$  dan  $H$ , Energi tersebut dapat dituliskan sebagai :

$$\begin{aligned} U &= -\mu_0 \bar{\mu} \bar{H} = -\mu_0 \mu H \cos \theta \\ &= -\mu_0 \mu_z H = -g \mu_0 \mu_B m_j H \end{aligned} \quad (2.8.7)$$

Dengan  $\theta$  sudut antara  $\bar{\mu}$  dan  $\bar{H}$



Gambar : 2. 8

Distribusi momen dipol magnetik bahan paramagnetik

Dengan memakai statistik Maxwell-boltzman harga magnetisasi dari zat paramagnetik dapat dirumuskan :

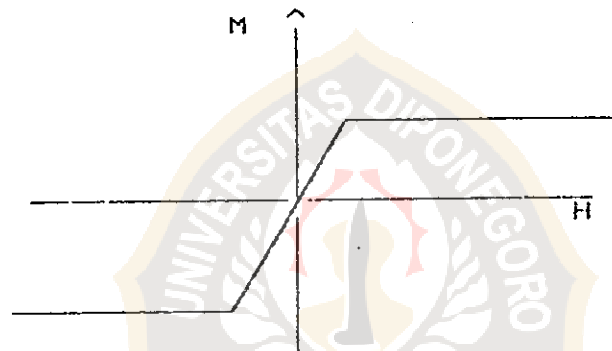
$$M = \frac{N g \mu_B \mu_0 j(j+1)H}{3 k T} \quad (2.8.8)$$

(Kittel. C, 1953)

Sehingga besarnya suseptibilitas dapat kita peroleh :

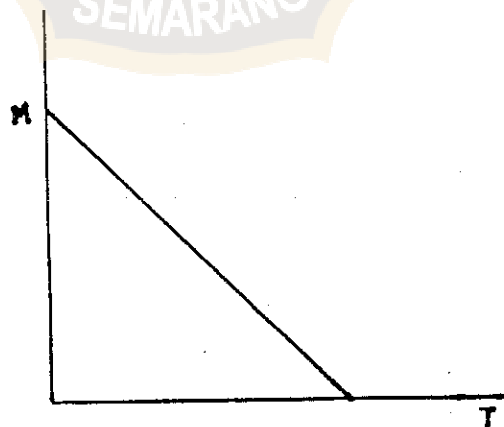
$$\begin{aligned} \chi_m &= \frac{M}{H} = \frac{N g \mu_B \mu_0 j(j+1)}{3 k T} \\ &= \frac{N \rho \mu_B \mu_0}{3 k T} \\ &= \frac{C}{T} \end{aligned} \quad (2.8.9)$$

Persamaan di atas terkenal dengan persamaan Currie dengan C merupakan konstanta currie.



Gambar : 2.9

Hubungan antara M dan H pada bahan paramagnetik



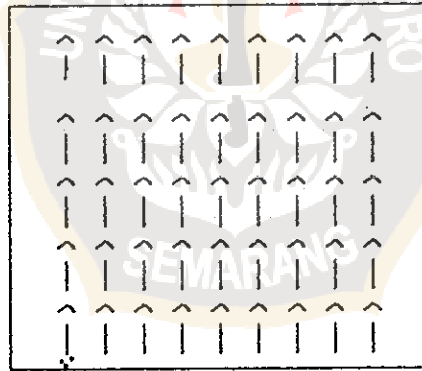
Gambar : 2.10

Hubungan antara M dengan T pada bahan paramagnetik

Beberapa contoh di bawah ini merupakan contoh yang termasuk bahan paramagnetik :biotit, siderit, chamosit dan lain sebagainya.

### 2.8.3. Ferromagnetik

Pada bahan ferromagnetik hubungan antar momen dipol magnetnya kuat sekali, dimana momen dipol magnet semua atom - atomnya searah melawan distribusi acak akibat adanya agitasi termal. Faktor lande atom - atom ferromagnetik hampir selalu berharga dua, yang berarti bahwa momen magnetiknya terutama ditimbulkan dari momen magnetik spin elektronnya. Maka dari itu sifat - sifat dari bahan ferromagnetik erat sekali hubungannya dengan kondisi spin elektron di dalam atom bahan tersebut.



Gambar : 2.11.

Distribusi momen dipol magnet bahan ferromagnetik

Pada bahan ferromagnetik ini atom - atomnya yang berdekatan akan memiliki energi interaksi antar momen magnetnya yang terdiri dari :

- a. Energi magnet
- b. Energi pertukaran



Oleh Heisenberg energi pertukaran yang menyangkut arah spin elektron sudah diturunkan secara mekanika kuantum dari interferensi fungsi gelombang yang merepresentasikan masing - masing elektron. Energi pertukaran ini tidak dapat diturunkan dengan model atom klasik.

Namun sebelumnya lebih dahulu dikenal istilah medan molekular, yang untuk pertama kali dikemukakan oleh Weiss dalam teori ferromagnetik klasiknya, jauh hari sebelum efek energi pertukaran diperkenalkan. Medan magnetik efektif  $H_{ef}$  untuk atom - atom didefinisikan oleh persamaan

$$\bar{H}_{ef} = \bar{H}_{ex} + \lambda \bar{M} \quad (2.8.10)$$

dengan,

$\bar{H}_{ef}$  = Kuat medan magnet efektif

$\bar{H}_{ex}$  = Kuat medan magnet luar

$\lambda$  = Tetapan medan molekular

$\bar{M}$  = Besarnya magnetisasi

Dari persamaan di atas terlihat  $\lambda M$  merupakan, medan molekular yang dikemukakan oleh Weiss, dasar paling kuat dalam memperkenalkan konsep medan magnetik molekular adalah dengan memperhitungkan hubungan timbal balik antara atom - atom yang berdekatan akibat adanya energi pertukaran.

Menurut Brillouin :

$$M = N \mu B_j(x) \quad (2.8.11)$$

Dengan  $x = \mu_o \mu H/kT$

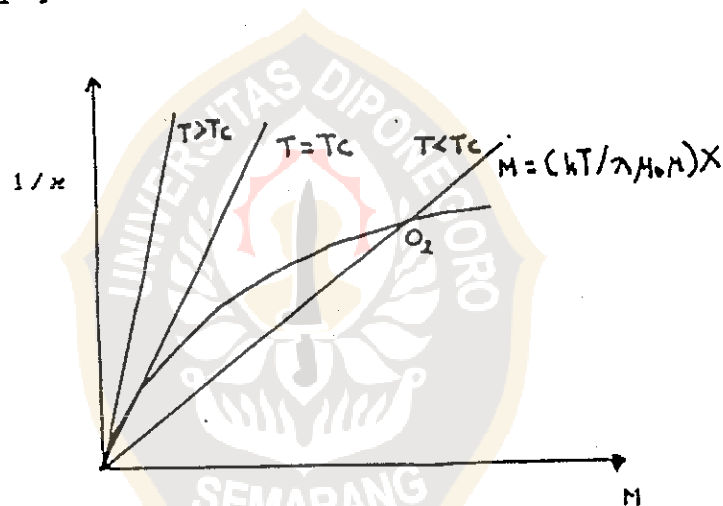
Sehingga dalam masalah ini kita dapat menuliskan

$$\chi = \frac{\mu_0 \mu H_{ef}}{k T} = \frac{\mu_0 \mu (H_{ex} + \lambda M)}{k T} \quad (2.8.12)$$

Sehingga dapat kita peroleh :

$$M = \left( \frac{kT}{\lambda \mu_0 \mu} \right) \chi - H_{ex} / \lambda \quad (2.8.13)$$

Baik dari persamaan (2.8.11) dan persamaan (2.8.13) sama-sama memberikan pernyataan magnetisasi  $M$  dan gambaran keduanya secara grafik, terlihat pada gambar di bawah ini :



Gambar : 2.12

Grafik antara  $M$  dan  $\chi$  bahan ferromagnetik

Dari grafik di atas terlihat bahwa pada saat tidak ada kuat medan magnet luar ( $H_{ex} = 0$ ), magnetisasi tidak sama dengan nol, tetapi berharga seperti yang ditunjukkan pada titik  $O_2$  pada gambar di atas. Maksudnya tetap ada magnetisasi pada saat tidak ada kuat medan magnet dari luar, magnetisasi inilah yang dinamakan magnetisasi

spontan, dilambangkan dengan  $M_{sp}$ , yang diartikan magnetisasi spontan per satuan volume.

Slope atau kemiringan grafik dari persamaan (2.8.13) dapat dinyatakan dengan :

$$\tan \theta = \frac{k T}{\lambda \mu_o \mu} \quad (2.8.14)$$

Apabila untuk  $x \rightarrow 0$ , maka  $B_{j(x)} = ((j+1)/3j)x$  sehingga kemiringan garis singgung untuk grafik persamaan (2.8.11) adalah :

$$\tan \theta = \frac{N \mu (j + 1)}{3 j} \quad (2.8.15)$$

Nilai  $x \rightarrow 0$  berkaitan dengan magnetisasi mendekati nol dan medan magnet luar nol. Magnetisasi di dalam bahan ferromagnetik menjadi nol pada suatu nilai temperatur  $T=T_c$  yang diperoleh dari persamaan (2.8.14) dan (2.8.15)

$$T_c = \frac{N \lambda \mu_o \mu^2 (j + 1)}{3kj} \quad (2.8.16)$$

$T_c$  merupakan temperatur currie pada bahan ferromagnetik, bila  $T > T_c$  bahan ferromagnetik akan bersifat paramagnetik, sehingga berlaku :

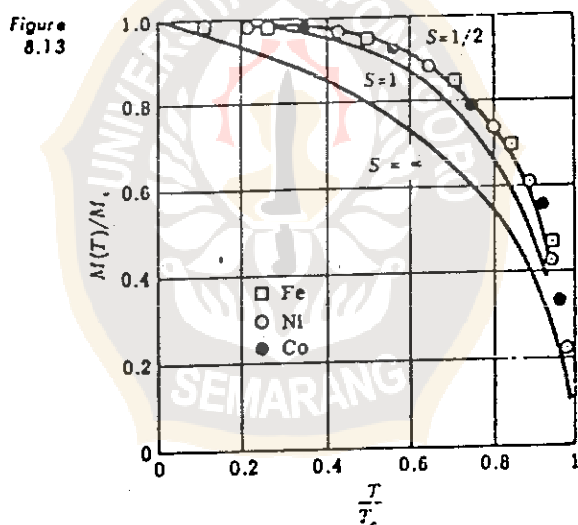
$$M T = C H_{ef} = C ( H_{ex} + \lambda M ) \quad (2.8.17)$$

Sehingga besarnya suseptibilitas diperoleh :

$$\begin{aligned} \chi_m &= \frac{M}{H_{ex}} \\ &= \frac{C}{(T - C\lambda)} \\ &= \frac{C}{(T - T_c)} \end{aligned} \quad (2.8.18)$$

Persamaan tersebut terkenal dengan sebutan Hukum Currie - Weiss.

Hubungan antara magnetisasi dan suhu pada bahan ferromagnetik ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



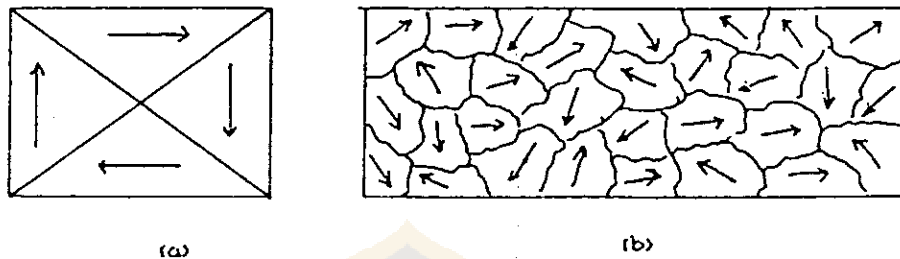
Gambar : 2.13

Grafik hubungan antara  $M$  dan  $T$ , pada bahan ferromagnetik

### 2.8.3.1. Domain dan Pengaruh Medan Magnet dari Luar

Pada temperatur kamar bahan - bahan ferromagnetik tidak menunjukkan sifat magnetnya, walaupun momen magnet

bahan ferromagnet adalah searah, momen magnetiknya sangat kecil, namun setelah diberikan pengaruh medan magnet dari luar pada bahan ferromagnet bahan tersebut akan mengalami pemagnetan. Untuk menerangkan kejadian seperti ini Weiss berpendapat adanya daerah - daerah magnetik pada bahan ferromagnetik. daerah - daerah magnetik ini disebut domain magnetik.



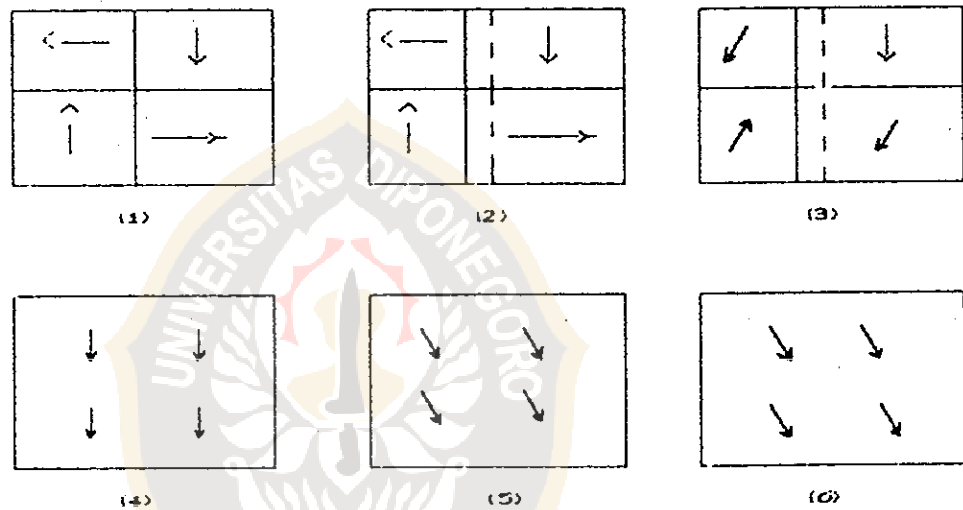
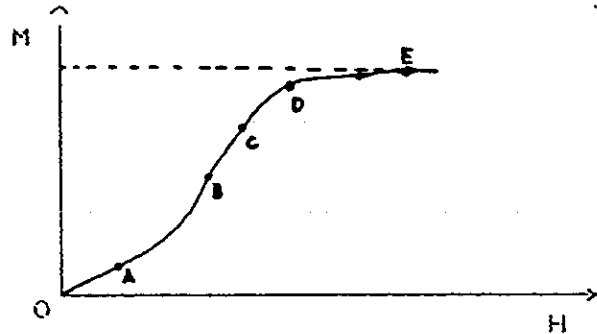
Gambar : 2.14  
 (a). Sebuah kristal tunggal dengan empat domain  
 (b). Kristal secara jamak

Di dalam satu domain momen - momen magnetik bahan ferromagnetik saling sejajar satu sama lainnya, tetapi dengan domain yang lainnya momen magnetiknya tidak saling sejajar, akibat dari arah momen magnet yang acak tersebut mengakibatkan bahan ferromagnetik secara keseluruhan tidak memiliki kemagnetan.

Pada saat bahan tersebut diberi pengaruh medan magnet dari luar, maka akan mengakibatkan adanya perputaran momen magnetik di dalam domain menuju ke arah medan magnet luar tersebut, dan untuk memutar momen magnetik ini diperlukan suatu tenaga yang sangat besar.

Pada gambar di bawah ini menjelaskan tingkatan proses pada saat bahan ferromagnetik sebelum diberi medan magnet luar, pada saat dikenai medan magnet luar, hingga seluruh

momen magnetik di dalam suatu bahan ferromagnetik sejajar dengan arah medan magnet luar tersebut.



Gambar : 2.15

Hubungan antara besarnya pemagnetan dengan perputaran momen

Pada keadaan awal dimana bahan belum diberi pengaruh medan magnet, pada grafik ditunjukkan pada titik O, keadaan bahan arah momen dipol magnetnya dalam satu domain dengan domain lainnya masih dalam keadaan acak, diperlihatkan pada gambar nomor 1, pada saat bahan diberi pengaruh medan magnet (pada titik: A) maka pada bahan ada usaha pelebaran domain yang arah momen

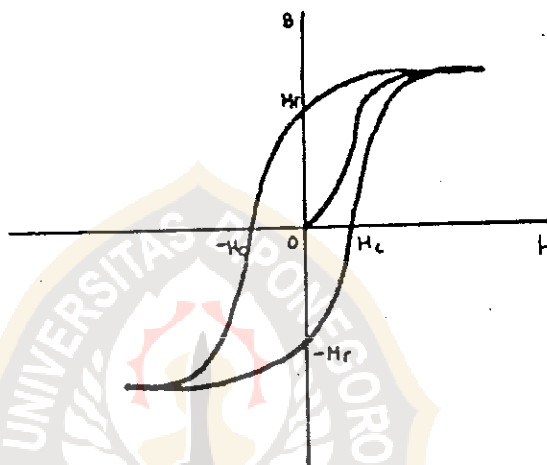
magnetnya sejajar dengan arah medan magnet, kejadian ini ditunjukkan oleh gambar yang kedua, apabila medan magnet yang mempengaruhi semakin diperbesar maka usaha pelebaran domain akan diikuti dengan usaha perputaran momen magnetnya (titik B), gambar ditunjukkan nomor 3, bila medan magnet terus diperbesar, (titik C dan D) maka akan momen magnetnya semakin berusaha menyejajarkan diri dengan arah medan magnet dari luar (gambar nomor 4 dan 5) yang pada akhirnya akan mencapai titik jenuh (titik E), dimana pada saat ini momen magnetnya sudah sejajar dengan arah medan magnet.

#### 2.8.3.2. Lingkaran Histeresis

Suatu bahan bila diberikan pengaruh medan magnet dari luar  $H$  yang semakin diperbesar sampai mencapai keadaan saturasi (jenuh), maka akan diperoleh alur kurva dimana  $B$  akan bertambah seiring dengan bertambahnya  $H$  hingga mencapai kondisi jenuh. Ketika medan magnet dikurangi maka kurva  $B$  akan turun tetapi tidak akan mengikuti alur kurva magnetisasi awal (saat pertambahan  $H$ ) tetapi menyimpang. Ketika medan magnet luar sama dengan nol, di sini masih ada magnetisasi yang berharga  $M_r$  yang disebut magnetisasi remanen, magnetisasi akan bernilai nol pada saat medan magnet luar bernilai  $-H_c$  yang disebut Medan koersif (Coersif Force), bila pertambahan medan ke arah negatif terus berlanjut, maka benda akan mengalami pemagnetan negatif hingga mencapai keadaan jenuh. Dengan membuat  $H$

nol kembali maka akan memperoleh  $-M_r$ , dan nilai nol untuk magnetisasi dicapai kembali pada medan magnet  $H_c$ , dan pertambahan selanjutnya menghasilkan saturasi positif.

Sumbu B (vertikal) yang terpotong oleh kurva menunjukkan jumlah sisa polarisasi induksi magnetik benda ketika benda magnet ditiadakan, sedangkan sumbu H (horisontal) menunjukkan besarnya pembalikan medan magnet yang dibutuhkan untuk menghilangkan induksi magnet.



Gambar 2.16 : Lingkaran Histeresis

Dari gambar di atas dengan adanya medan magnet dari luar maka ada medan yang menyejajarkan domain dan magnetisasi. Dengan meningkatnya temperatur energi termal akan merubah daerah dan magnetisasi akan berkurang ketika suhu mendekati  $T_c$ ,  $M$  akan berkurang terus menerus sehingga sampai menjadi nol.

#### 2.8.4. Antiferromagnetik

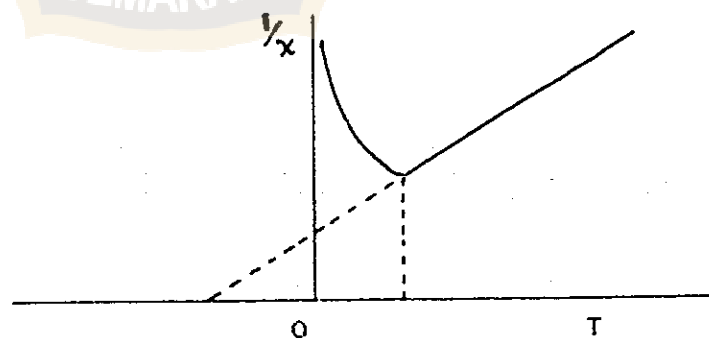
Pada beberapa bahan magnetik kita sering menemukan sifat yang magnetik yang khas, maksudnya bahan tersebut



tidak termasuk bahan paramagnetik, namun juga tidak termasuk bahan ferromagnetik, bahan ini biasanya memiliki harga suseptibilitas magnetik antara  $10^{-2}$  serupa dengan bahan paramagnetik, tetapi memiliki nilai maksimum pada nilai temperatur tertentu yaitu  $T_N$ , yang biasa disebut temperatur Neel.

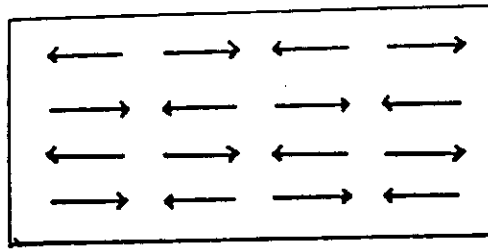
Keadaan temperatur dibawah temperatur Neel diperkirakan dimana spin - spin atom yang berdekatan tidak sejajar satu dengan yang lainnya, menghasilkan interaksi pertukaran yang negatif, sedangkan pada bahan ferromagnetik spin - spinnya saling sejajar memberikan interaksi pertukaran yang positif, bahan magnetik yang kondisinya seperti ini dinamakan bahan antiferromagnetik. Suseptibilitas bahan antiferromagnetik dinyatakan dengan persamaan :

$$\chi = \frac{C}{T + \theta} \quad (T > T_N) \quad (2.8.19)$$



Gambar 2.17

Grafik hubungan antara  $1/\chi$  dan  $T$  pada bahan antiferromagnetik



Gambar :2. 18  
Distribusi momen dipol magnet bahan  
antiferromagnetik

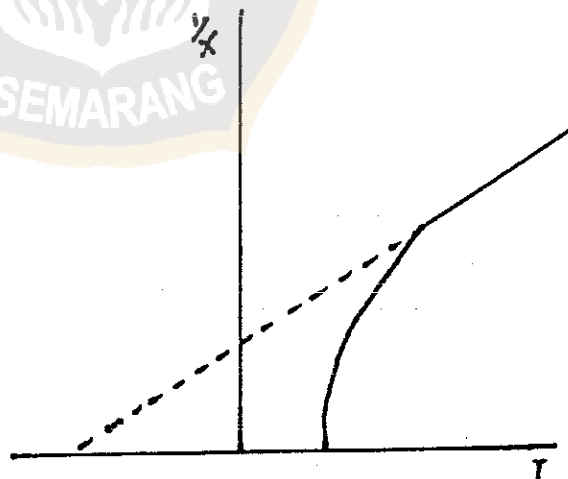
Susunan momen magnetik dari atom - atom bahan antiferromagnetik dapat dilihat seperti pada gambar di atas, sesuai dengan hasil eksperimen difraksi neutron pada beberapa bahan. Dari sini bisa diketahui bahwa bahan antiferromagnetik memiliki keteraturan mirip dengan bahan ferromagnetik, perbedaannya hanya terletak pada kopling spinnya. Beberapa contoh bahan antiferromagnetik antara lain : ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ ), hematit ( $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), dan triolit ( $\text{FeS}$ ).

#### 2.8.5. Ferrimagnetik

Pada bahan ferromagnetik kemagnetanya mengalami kejenuhan pada temperatur  $T = 0 \text{ K}$ , dalam keadaan ini momen magnet - momen magnetnya sudah mengalami penyejajaran diri searah medan magnet.

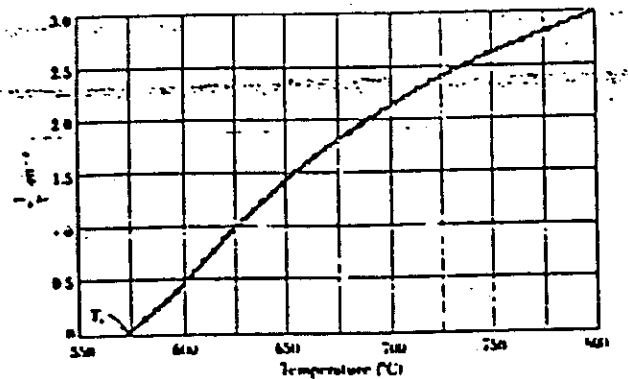
Pada bahan magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), apabila kita melihat sifat-sifatnya secara makroskopis maka kita dapat menggolongkan bahan ini ke dalam golongan bahan ferromagnetik karena bahan ini juga memiliki momen magnet elementer sejajar, namun apabila kita meneliti lebih lanjut maka kita akan menjumpai sifat yang khas yang ada

pada bahan ini yang tidak dimiliki oleh bahan ferromagnetik. Satu alasan yaitu apabila bahan magnetik ini merupakan bahan ferromagnetik, maka bahan ini akan mempunyai momen magnetik total pada tiap satuan molekulnya sebesar  $5\mu_B + 4\mu_B + 5\mu_B = 14\mu_B$ . Hal ini terjadi karena  $Fe^{2+}$  dan  $Fe^{3+}$  masing - masing memiliki 6 dan 5 elektron pada sub kulit 3d, yang berarti bahwa masing - masing memiliki 5 dan 4 elektron yang tidak memiliki pasangan, padahal hasil pengukuran yang dilakukan oleh Weiss dan Forres memperoleh harga  $4,08 \mu_B$ . Dan apabila kita melihat pada grafik hubungan  $1/\chi$  terhadap T, bahwa magnetit memperlihatkan adanya penyimpangan dari kurva Currie-Weiss untuk ferromagnetik, dimana di atas temperatur currie, untuk kurva bahan magnetit ini tidak linier seperti halnya kurva Currie - Weiss untuk bahan-bahan ferromagnetik.



Gambar : 2.10

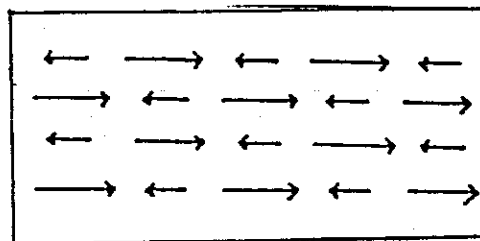
Grafik hubungan antara  $1/\chi$  dan T pada bahan ferrimagnetik



Gambar : 2.20

Grafik hubungan antara  $1/X$  dan  $T$  pada bahan magnetik

Berdasarkan data - data di atas, maka Neel menyimpulkan bahwa bahan magnetik termasuk bahan ferrimagnetik, bukan bahan ferromagnetik. Momen magnet ion-ion logam yang menempati kedudukan A dan kedudukan B saling anti sejajar satu sama lain, tetapi karena momen magnetik pada kedudukan yang satu lebih besar daripada kedudukan yang lainnya maka secara keseluruhan masih memiliki magnetisasi spontan, seperti halnya pada bahan ferromagnetik, maka momen total per satuan molekulnya menjadi  $5\mu_B + 4\mu_B - 5\mu_B = 4\mu_B$ , dan hasil ini ternyata sesuai dengan yang diperoleh oleh Weiss dan Forres secara eksperimen.



Gambar : 2.21

Distribusi momen dipol magnetik pada bahan ferrimagnetik

Kedudukan momen dipol magnet ion - ion pada bahan ferrimagnetik kita bagi menjadi dua yaitu kedudukan A dan kedudukan B, ion - ion kedudukan A memiliki kedudukan sejajar satu dengan yang lain, begitu pula halnya dengan ion - ion pada kedudukan B, namun momen - momen magnetik ion - ion pada kedudukan A dan ion - ion pada kedudukan B saling anti sejajar satu dengan yang lainnya, interaksi antara momen - momen magnetik ion - ion pada kedudukan A dan kedudukan B yang satu lebih besar dari yang lainnya.

Beberapa contoh bahan - bahan yang termasuk dalam ferrimagnetik yaitu ulvospinel ( $\text{FeTiO}_4$ ), maghemit ( $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), dan pirolit.

