

## KB 1. Usaha Magnetik Dan Pendinginan Magnetik

### 1.1 Usaha Magnetik.

Interaksi magnetik merupakan hal yang menarik dalam bidang Fisika. Interaksi magnetik ini merupakan hal yang sangat penting dalam mempelajari zat padat pada suhu rendah dan dapat menyediakan cara-cara untuk mencapai suhu yang sangat rendah.

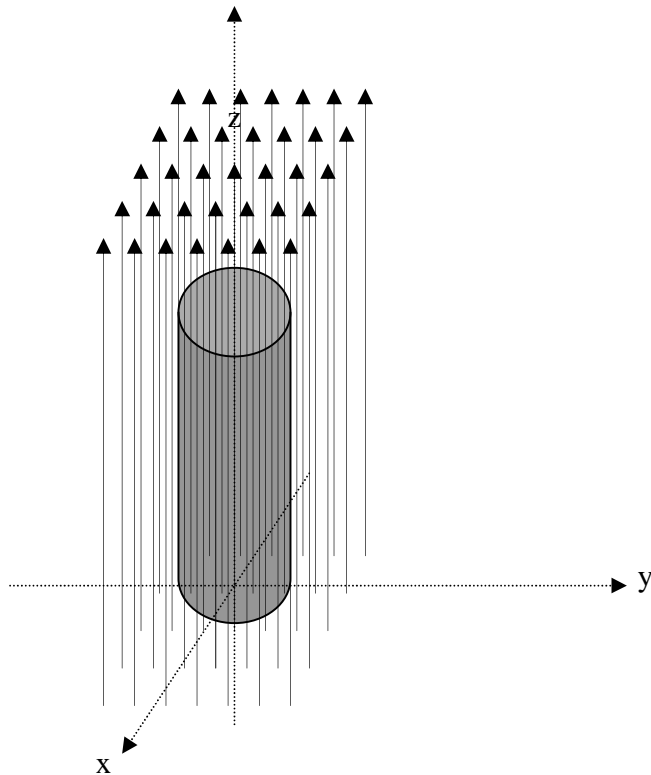
Pelajaran tentang sebuah sistem makroskopik pada suhu yang sangat rendah memberi suatu kesempatan untuk menginvestigasi sistem tersebut ketika sistem itu berada dalam keadaan dasarnya dan dalam keadaan-keadaan kuantum yang terletak sangat dekat dengannya. *Jumlah keadaan-keadaan* seperti itu yang cocok dengan sistem tersebut atau dengan entropi yang bersangkutan adalah *sangat kecil*. Karena itu, sistem itu menunjukkan keacakan (randomness) yang lebih sedikit dari pada keacakan pada suhu tinggi. Dengan kata lain, pada suhu rendah sistem itu memiliki derajat keteraturan yang tinggi. Jadi, keadaan suhu rendah ditandai oleh sebuah kesederhanaan yang fundamental dan oleh kemungkinan bahwa beberapa sistem mungkin menunjukkan sebuah derajat keteraturan yang tinggi. *Sebagai contoh* dari keteraturan seperti itu ditunjukkan oleh sebuah sistem spin pada suhu rendah yang disejajarkan satu dengan yang lainnya sehingga menimbulkan sifat feromagnetisme. *Sebuah contoh* lain yang lebih spektakuler adalah Helium cair yang tetap cair meskipun suhunya diturunkan sampai nol derajat Kelvin pada tekanan yang tidak lebih dari 25 atmosfer. Di bawah suhu kritis 2,18 K Helium cair ini menjadi *superfluida (superfluid)*. Superfluid ini tidak memiliki gaya gesekan dengan dinding sehingga ia dapat mengalir tanpa gaya gesekan dan dapat melewati lubang yang sangat kecil dengan sangat mudah. *Contoh spektakuler* lainnya dapat ditunjukkan oleh beberapa logam seperti timah dan timah hitam yang dapat menjadi superkonduktor pada suhu kritisnya yang sangat rendah. Elektron-elektron konduksi di dalam logam-logam ini mengalir betul-betul tanpa gesekan dan menjadikan logam-logam itu sebagai konduktor listrik yang sempurna (dengan resistivitas nol) dan memiliki sifat-sifat kemagnetan, yang biasa ditunjukkan oleh adanya efek Meissner.

Ada baik kalau kita lacak seberapa rendah suhu rendah yang kita maksud. Di samping itu, mungkin Anda juga ingin mengetahui dalam prakteknya seberapa dekat sebuah sistem makroskopik dapat dibawa mendekati ke keadaan dasarnya, atau dengan kata lain, dalam

prakteknya, seberapa rendah suhu sistem tersebut dapat didinginkan. Helium adalah sebuah gas yang akan mengembun (berubah dari fase gas menjadi fase cair) pada suhu terendah, yaitu 4,2 K pada tekanan satu atmosfer. Suhu Helium cair tersebut masih dapat terus didinginkan sampai sekitar 1 K dengan cara membuang uap Helium di atas Helium cair sehingga tekanannya berkurang. Jadi jika kita dapat memiliki Helium cair yang bersuhu 1 K, maka kita akan dengan mudah dapat mendinginkan setiap zat padat sampai 1 K hanya dengan cara mencelupkannya ke dalam Helium cair tersebut. Bahkan dengan menggunakan sebuah metoda lain yang melibatkan usaha magnetik (yang akan dibahas pada bagian berikutnya) kita dapat mendinginkan zat padat sampai suhunya mencapai 0,01 K atau bahkan 0,001 K. Perluasan dari metoda ini bahkan dapat mencapai suhu serendah  $10^{-6}$  K. Dengan demikian Anda diharapkan dapat memperoleh kesan seberapa rendah suhu rendah yang kita maksud; yakni sekitar  $10^{-6}$  K sampai 1 K. Menurut perasaan Anda kira-kira bagaimana dinginnnya suhu seperti ini ? Ingat suhu es (air yang membeku adalah  $0\text{ C} = 273,16\text{ K}$ ).

Sekarang marilah kita pelajari teknik pendinginan yang dapat mencapai suhu serendah seperti yang dijelaskan di atas. Kita misalkan memiliki sebuah sistem dengan volume  $V$  yang diletakkan di dalam medan magnet luar. Sistem tersebut kita misalkan sebuah sampel berbentuk silinder yang berupa sebuah zat padat dan bersifat magnetik. Lihat Gambar 1 di bawah.

Kita asumsikan bahwa medan luar ( $H_a$ ) adalah serba sama (uniform) di dalam seluruh volume sampel. Di samping itu, juga kita asumsikan bahwa silinder itu sangat panjang di banding dengan diameternya dan selalu sejajar dengan medan magnet luar  $H_a$ , sehingga rata-rata momen magnet persamaan satuan volume ( $M_o = M/V$ ) juga serba sama (uniform) dalam seluruh volume sampel dan selalu sejajar dengan  $H_a$ . Jika  $\vec{h}$  menyatakan medan magnet di dalam sampel, maka  $H = H_a$ . Anda juga pasti masih ingat bahwa induksi medan magnet ( $B$ ) dikaitkan dengan  $H$  melalui persamaan :



Gambar 1. Sebuah sampel berbentuk silinder yang diletakkan di dalam medan magnet luar  $H_a$  yang sejajar sumbu z.

$$B = H + 4\pi M_o \quad (1)$$

Di luar sampel dimana  $M_o = 0$ ,  $B = H = H_a$ . Suseptibilitas magnet ( $\chi$ ) persamaan satuan volume sampel didefinisikan oleh perbandingan antara  $M_o$  dengan  $H$ , yaitu sebagai berikut:

$$\chi = M_o/H. \quad (2)$$

Dengan demikian, persamaan (1) di atas dapat ditulis dalam bentuk

$$B = (1 + 4\pi\chi) H = \mu' H, \quad (3)$$

dimana  $\mu'$  disebut permeabilitas magnet dari sampel.

Selanjutnya, untuk menerapkan argumen makroskopik dari statistika termodinamika kepada sebuah sistem magnetik seperti pada persamaan (3) di atas adalah persamaan fundamental berikut ini:

$$dQ = T dS = dE + dW \quad (4)$$

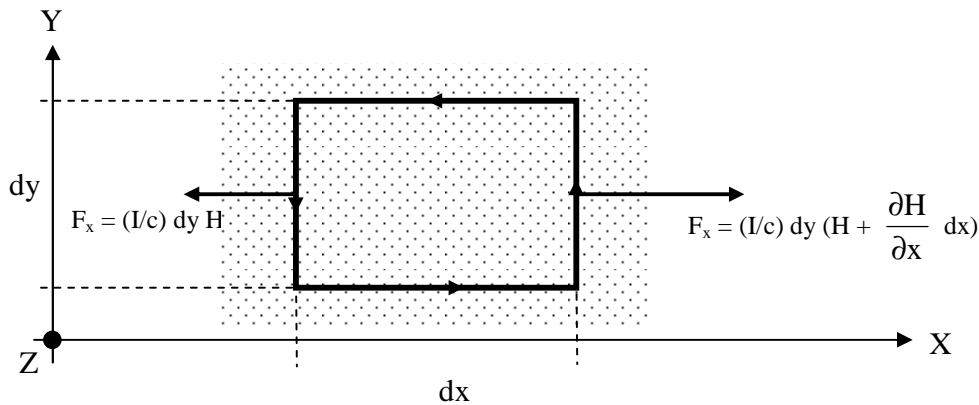
yang cocok untuk setiap proses statis. Di sini sampel tersebut ditandai oleh dua parameter luar, yaitu volume ( $V$ ) dan medan magnet luar ( $H_a$ ). Karena itu, usaha total  $dW$  yang dikerjakan oleh sistem mencakup tidak hanya usaha mekanik ( $p dV$ ) yang dilakukan oleh tekanan dalam sebuah perubahan volume  $dV$ , tetapi juga usaha magnetik  $dW^{(m)}$  yang dikaitkan dengan adanya perubahan  $H_a$ . Selanjutnya kita akan menurunkan persamaan untuk usaha magnetik  $dW^{(m)}$  ini.

Untuk tujuan penyerderhanaan, kita anggap bahwa medan magnet selalu dalam arah sumbu  $z$  dan sampel selalu disejajarkan dengan medan magnet dan tentunya juga dengan sumbu- $z$ . Karena itu, medan magnet di dalam sampel dan momen magnetnya ( $M$ ) juga sejajar dengan sumbu  $z$  dan  $H = H_a$ . Kita misalkan bahwa sampel berada dalam keadaan  $r$ , dimana momen magnet totalnya adalah  $M_r$ , dan bahwa medan magnet luarnya  $H_a = H$  di tempat sampel secara perlahan diubah sedikit. Usaha yang dikerjakan dalam proses ini tidak dapat bergantung hanya pada bagaimana medan magnet diubah. Karena itu, marilah kita bayangkan bahwa kuat medan magnet luar tidak tepat serba sama (uniform) dalam ruang, tetapi medan itu menghilang di jauh tak hingga dan sedikit demi sedikit berubah sedemikian rupa sehingga nilai  $H_a$  di dalam daerah sampel adalah tetap ada. Kemudian medan magnet mengerjakan gaya pada sampel. Gaya tersebut memiliki komponen gaya dalam arah sumbu- $x$  :

$$F_x = M_r (\partial H / \partial x) \quad (5)$$

Selanjutnya perhatikanlah Gambar 2 di bawah ini. Kita misalkan memiliki sebuah rangkaian tertutup yang dialiri arus dalam arah yang berlawanan jarum jam. Kemudian sumbu  $z$ -positif

adalah searah dengan medan magnet yang arahnya keluar dari bidang buku, sehingga arah sumbu x dan sumbu y seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian tertutup yang dialiri arus listrik diletakkan dalam medan magnet  
Diagram ini memberi ilustrasi gaya yang dikerjakan oleh medan magnet H pada sebuah momen magnet yang dinyatakan oleh sebuah rangkaian arus empat persegi panjang yang kecil.

Resultan gaya dalam arah sumbu x adalah  $F_x = (I/c) dy (H + \frac{\partial H}{\partial x} dx) = M \frac{\partial H}{\partial x}$ , dimana I adalah arus listrik dan  $M = (I/c) dy \cdot dx$  adalah momen dipol magnet dari rangkaian arus tersebut.

Sekarang kuat medan magnet di tempat sampel (rangkainan arus) dapat diubah dengan cara menggerakkan sampel secara peralihan dari posisi x dimana  $H = H(x)$  sampai ke posisi  $x + dx$  dimana  $H = H(x + dx)$ . Untuk melakukan hal ini kita harus memberi gaya sebesar  $-F(x)$  kepada sampel dalam arah sumbu x dan harus mengerjakan usaha pada sampel sebesar  $dW_r^{(m)}$  yang berfungsi untuk menaikkan energi sampel sebesar  $dE$  pada keadaan ahir menjadi. Jadi

$$dW_r^{(m)} = dE^{(m)} = -F(x) \cdot dx = \{-M_r (\partial H / \partial x)\} \cdot dx \quad (6)$$

atau

$$dW_r^{(m)} = dE^{(m)} = -M_r dH. \quad (7)$$

Jadi

$$M_r = -\partial E^{(m)} / \partial H \quad (8)$$

Dengan cara mengambil nilai rata-rata dari persamaan (7) kita dapat memperoleh (untuk usaha magnetik makroskopik  $dW^{(m)}$  yang dikerjakan oleh sampel ketika medan magnet di tempat sampel diubah sebesar  $dH$ ) hasil

$$dW^{(m)} = - dW^{(m)} = M dH$$

dimana  $M$  adalah rata-rata momen magnet total dari sampel. Dengan demikian persamaan fundamental termodinamika (4) dapat ditulis sebagai berikut:

$$T dS = dE + p dV + M dH, \quad (9)$$

dimana dua suku terakhir dalam persamaan (9) menyatakan usaha total yang dikerjakan oleh sampel.

## 1.2 Pendinginan Magnetik.

Karena kita dapat melakukan usaha pada sebuah sampel dengan cara mengubah medan magnet luar, maka kita juga dapat memanaskan atau mendinginkan sebuah sampel yang secara termal terisolasi dengan cara mengubah medan magnet. Metoda ini memungkinkan kita untuk mencapai suhu yang sangat rendah. Metoda tersebut dapat dijelaskan dengan cara membandingkan metoda itu dengan sebuah analogi mekanika. Misalkan kita akan mendinginkan sebuah gas oleh usaha mekanik seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.