

BAB II

TINJAUAN TEORI

2.1. Resistivitas Listrik suatu bahan konduktor.

Resistivitas listrik suatu bahan logam maupun campuran logam (*alloy*) akan berkurang bila bahan didinginkan. Pada temperatur rendah, vibrasi thermal dari atom-atom menurun dan frekwensi hamburan dari elektron konduksi karena tumbukan berkurang. Oleh karena itu elektron-elektron akan mengalami sedikit hambatan dalam gerakannya. Perilaku ini menyebabkan hambatan listrik pada bahan berkurang. Demikian juga sebaliknya pada temperatur yang lebih tinggi akan menyebabkan hambatan listrik suatu bahan bertambah. (Beiser, A., 1983).

Pada bahan konduktor sesuai dengan hukum Ohm, resistivitas bahan diberikan

$$\rho = \frac{m}{n \cdot e^2 \cdot \tau} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana m = massa elektron

n = konsentrasi elektron

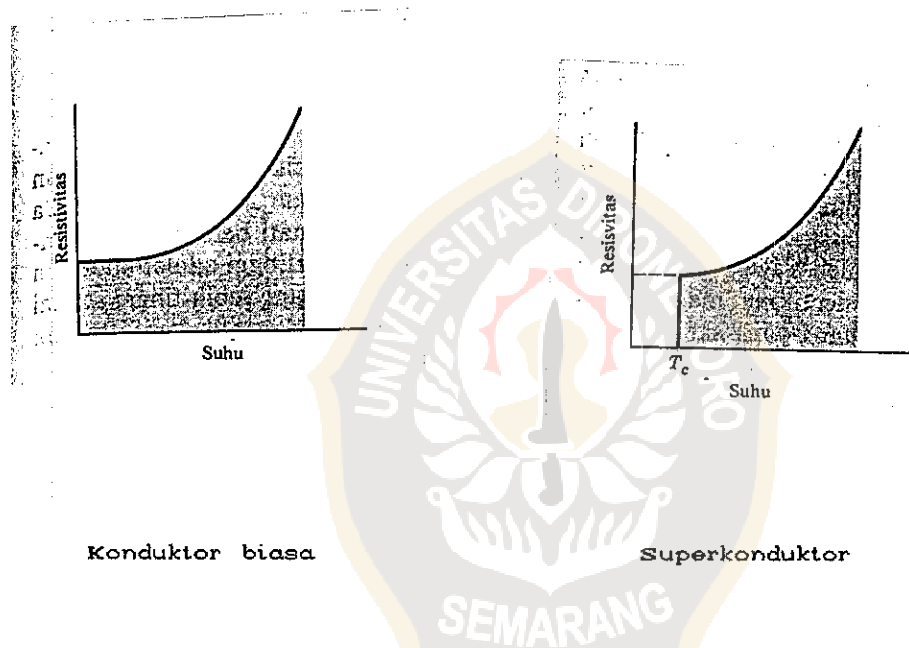
e = muatan elektron

τ = waktu tumbukan antara elektron dengan kisi.

Suatu bahan resistivitasnya mendadak nol pada temperatur yang sangat rendah, gejala inilah yang disebut

dengan superkonduktivitas. Temperatur dimana terjadi peralihan dari keadaan normal ke keadaan superkonduktor atau sebaliknya disebut temperatur kritis (T_c) superkonduktor (Krane, K., 1992).

Perubahan resistivitas akibat perubahan temperatur pada dua konduktor, yaitu konduktor biasa, dan bahan superkonduktor diperlihatkan pada gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1. Hubungan resistivitas ρ terhadap temperatur T . (Krane, K., 1992)

2.2. Konsekuensi hambatan listrik nol pada superkonduktor.

Elektron-elektron pembawa arus dalam bahan superkonduktor tidak mengalami hambatan dalam gerakannya,

elektron-elektron ini disebut elektron super. Jika bahan superkonduktor dikenai medan listrik konstan E , percepatan elektron dalam keadaan tunak berlaku hubungan

$$m \dot{v}_s = e E \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana v_s = Kecepatan elektron super

m = Massa elektron super.

e = Muatan elektron super

Jika ada sejumlah n_s elektron super persatuan volume bergerak dengan kecepatan v_s , rapat arus elektron super adalah

$$J_s = n_s e v_s \dots\dots\dots (2.3)$$

Dari persamaan (2.2) dan (2.3) didapat persamaan

$$J_s = \frac{n_s e^2}{m} E \dots\dots\dots (2.4)$$

Untuk mencapai persamaan yang menggambarkan medan magnet dari bahan superkonduktor, digunakan hubungan persamaan Maxwell (Wangness, R.K., 1979). Untuk bahan konduktor dari persamaan Maxwell diberikan :

$$\dot{\mathbf{B}} = -\text{Curl } \mathbf{E} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\text{curl } \mathbf{H} = \mathbf{J}_c + \dot{\mathbf{D}} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\text{Div } \mathbf{B} = 0 \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{J}_c + \mathbf{J}_s + \dot{\mathbf{D}}) \dots\dots\dots (2.8)$$

- Dimana \mathbf{D} = Arus pergeseran
 \mathbf{B} = Rapat fluk magnetik
 \mathbf{H} = Kuat medan magnet
 \mathbf{E} = Kuat medan listrik
 \mathbf{J}_c = Rapat arus konduksi
 \mathbf{J}_s = Rapat arus permukaan

Dalam superkonduktor rapat arus karena pengaruh medan magnet adalah rapat arus permukaan. Jadi rapat arus dalam bahan berpengaruh terhadap besarnya rapat fluk magnetik \mathbf{B} dan tidak mempengaruhi besarnya kuat medan magnet \mathbf{H} (Rose, A.C., 1978). Sehingga persamaan (2.8) dapat ditulis dalam bentuk :

$$\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{J}_s + \dot{\mathbf{D}}) \dots\dots\dots (2.9)$$

Bahan superkonduktor bukan merupakan bahan dielektrik dan dalam bahan tidak ada perubahan medan listrik, maka

pergeseran listrik \mathbf{D} pada persamaan (2.9) diabaikan (Rose, A.C., 1978), sehingga persamaan tersebut menjadi

$$\text{curl } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}_S \dots\dots\dots (2.10)$$

Substitusi persamaan (2.4) ke persamaan (2.5) memberikan

$$\mathbf{B} = - \frac{m}{\mu_0 n_s e^2} \text{curl curl } \mathbf{B} \dots\dots\dots (2.11)$$

Untuk menyederhanakan kita tampilkan konstanta baru α yang besarnya $m/\mu_0 n_s e^2$, sehingga persamaan menjadi :

$$\mathbf{B} = -\alpha \text{curl curl } \mathbf{B} \dots\dots\dots (2.12)$$

Dengan menggunakan hubungan

$$\text{curl curl } \mathbf{B} = \text{grad div } \mathbf{B} - \nabla^2 \mathbf{B} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dari persamaan persamaan Maxwell $\text{div } \mathbf{B} = 0$ (2.7), maka persamaan (2.12) menjadi :

$$\mathbf{B} = -\alpha \nabla^2 \mathbf{B} \dots\dots\dots (2.14)$$

F. London dan H. London mengasumsikan bahwa \mathbf{B} pada superkonduktor dari persamaan (2.13) tersebut merupakan besarnya medan magnet \mathbf{B} dari bahan tersebut

(Rose, A.C., 1978), sehingga persamaan tersebut dapat ditulis menjadi :

$$B = -\alpha \nabla^2 B \dots\dots\dots (2.15)$$

$$\nabla^2 B = \frac{1}{\alpha} B \dots\dots\dots (2.16)$$

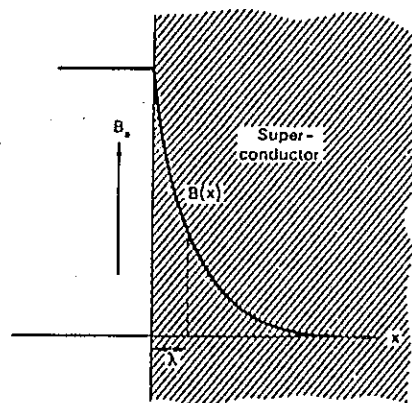
Apabila B dalam arah sejajar dengan sumbu x maka persamaan (2.16) menjadi :

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} B \dots\dots\dots (2.17)$$

Penyelesaian dari persamaan tersebut adalah

$$B(x) = B_a \exp \left(\frac{-x}{\sqrt{\alpha}} \right) \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana B(x) adalah besar medan magnet fungsi dari posisi di dalam bahan dan B_a besar medan magnet luar . Persamaan (2.18) ini berarti medan magnet akan berkurang secara eksponensial ketika menembus bahan. Dengan kata lain rapat fluks tidak menembus jauh ke dalam bahan superkonduktor. Hal ini dapat terlihat dalam gambar 2.2 di bawah ini

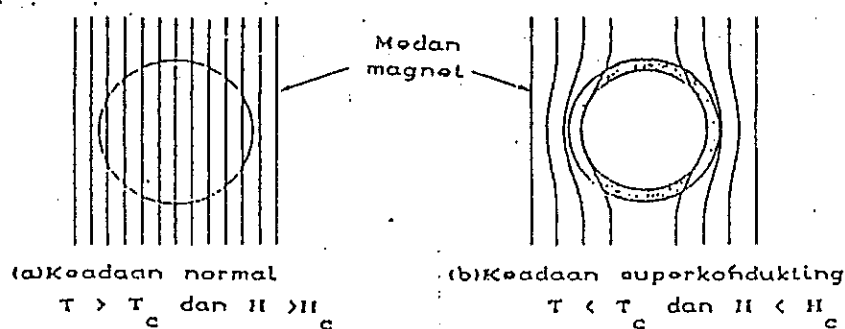


Gambar 2.2. Medan magnet berkurang secara eksponensial ketika menembus bahan superkonduktor (Rose, A.C., 1978)

2.3. Efek Meissner

Di tahun 1933 dua orang fisikawan Jerman yaitu *Meissner* dan *Ochsenfeld*, mengamati bahwa superkonduktor memberikan tolakan terhadap fluks magnetik, suatu fenomena yang dikenal dengan efek Meissner. (Rose, A.C., 1978)

Dalam suatu rangkaian percobaan terhadap superkonduktor silinder mereka memperlihatkan bahwa ketika temperatur diturunkan hingga temperatur kritis (T_c), fluks ini secara tiba-tiba mengalami tolakan ketika sampel memasuki fase superkonduktivitas, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.3. (tolakan terhadap fluks terus berlanjut untuk $T < T_c$)



Gambar 2.3. Efek meissner : fluk magnetik tertolak dari superkonduktor, yaitu untuk $T < T_c$.
(Rose, A.C., 1978)

Suatu bahan logam bila diberi pengaruh medan magnet dengan intensitas H , maka induksi magnetik di dalam bahan adalah :

$$B = \mu_0 (H + M) \dots \dots \dots (2.19)$$

Dimana M adalah magnetisasi bahan.
Kuat medan magnet yang timbul dengan menggunakan medan magnet luar B adalah sebesar :

$$H = \frac{B}{\mu_0} \dots \dots \dots (2.20)$$

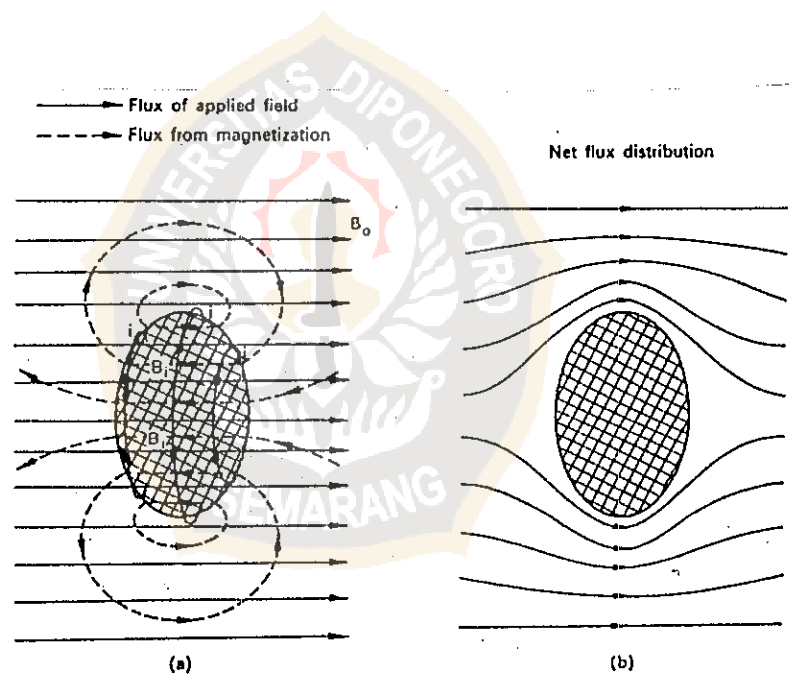
Pada bahan superkonduktor induksi magnetik B di dalam bahan adalah nol maka :

$$M = -H \dots\dots\dots (2.21)$$

Suseptibilitas magnetik (X_m) didefinisikan sebagai perbandingan magnetisasi bahan terhadap kuat medannya, sehingga didapat

$$X_m = \frac{M}{H} = -1 \dots\dots\dots (2.22)$$

Kondisi semacam itu dikenal sebagai bahan diamagnetik sempurna. Gambar 2.4. di bawah mengilustrasikan distribusi fluk magnetik pada bahan diagnetik sempurna.



Gambar 2.4. Distribusi fluk magnetik pada bahan diamagnetik sempurna. (Rose, A.C., 1978)

Pada gambar 2.4. terlihat adanya penolakan fluk magnetik, ini disebabkan karena ketika bahan superkonduktor didinginkan pada temperatur transisinya dikenai medan magnet, maka akan timbul arus permukaan yang arahnya mengelilingi permukaan. Arus permukaan ini akan menghasilkan medan magnet yang secara tepat berlawanan arah dengan rapat fluk medan magnet luar dan rapat fluk dalam bahan superkonduktor tetap nol. (Rose, A.C., 1978)

2.4. Medan magnet kritis

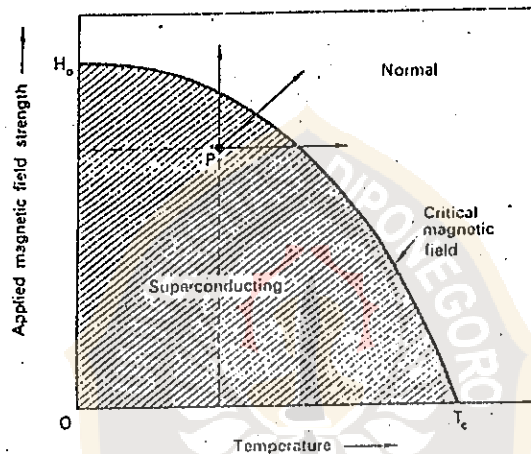
Salah satu penerapan superkonduktor yang segera terpikirkan adalah dihasilkannya elektromagnetik yang sangat kuat. Alangkah baiknya bila bisa memiliki medan magnet tinggi tanpa kehilangan daya.

Tetapi ditemukan bahwa diatas suatu harga tertentu yaitu diatas medan magnet kritisnya superkonduktor menjadi normal (keadaan superkonduktivitasnya terlampaui). Jika medan magnet yang cukup kuat diterapkan pada sampel superkonduktor , maka sampel tersebut akan kembali normal walaupun pada temperatur dibawah temperatur kritisnya $T < T_c$ (Buckel, W., 1991). Sehingga untuk mendapatkan resistivitas nol tidak hanya temperatur saja diperhatikan tetapi juga medan magnet harus dijaga dibawah suatu harga ambang tertentu. Eksperimen dengan berbagai superkonduktor telah menunjukkan bahwa hubungan antara

medan magnet dengan temperatur dirumuskan secara empiris sebagai :

$$H_c = H_0 [1 - (T/T_c)^2] \dots\dots\dots (2.23)$$

Hubungan ini di plot pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 . Medan magnet kritis sebagai fungsi temperatur. (Buckel, W., 1991)

Tampak dilihat bahwa material superkonduktor adalah normal diatas kurva dan menjadi superkonduktor dibawah kurva. Superkonduktor hanya dapat terjadi jika medan magnet eksternal lebih kecil dari harga medan magnet kritis.

2.5. Rapat arus kritis superkonduktor

Arus kritis adalah besar arus yang menyebabkan terjadinya peralihan dari keadaan superkonduktor ke keadaan normal atau sebaliknya tanpa merusak keadaan bahan tersebut. Berdasarkan beberapa hasil percobaan diketahui besarnya arus kritis superkonduktor dipengaruhi oleh temperatur dan medan magnet disekitarnya. Sampai saat ini para ahli masih belum menemukan teori untuk menghitung arus kritis superkonduktor. Jadi sampai saat ini arus kritis superkonduktor diukur secara eksperimental. Eksperimen yang banyak dilakukan dalam pengukuran arus kritis superkonduktor adalah dengan metode " *I-V Curve technique*". Dari metode tersebut dapat terhitung besar arus kritis superkonduktor. Untuk mendapatkan hasil rapat arusnya sesuai persamaan :

$$J_c = \frac{I_c}{A} \dots \dots \dots (2.24)$$

Dengan A adalah luas permukaan bahan superkonduktor tegak lurus yang dilalui arus.

2.6. Struktur kristal superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

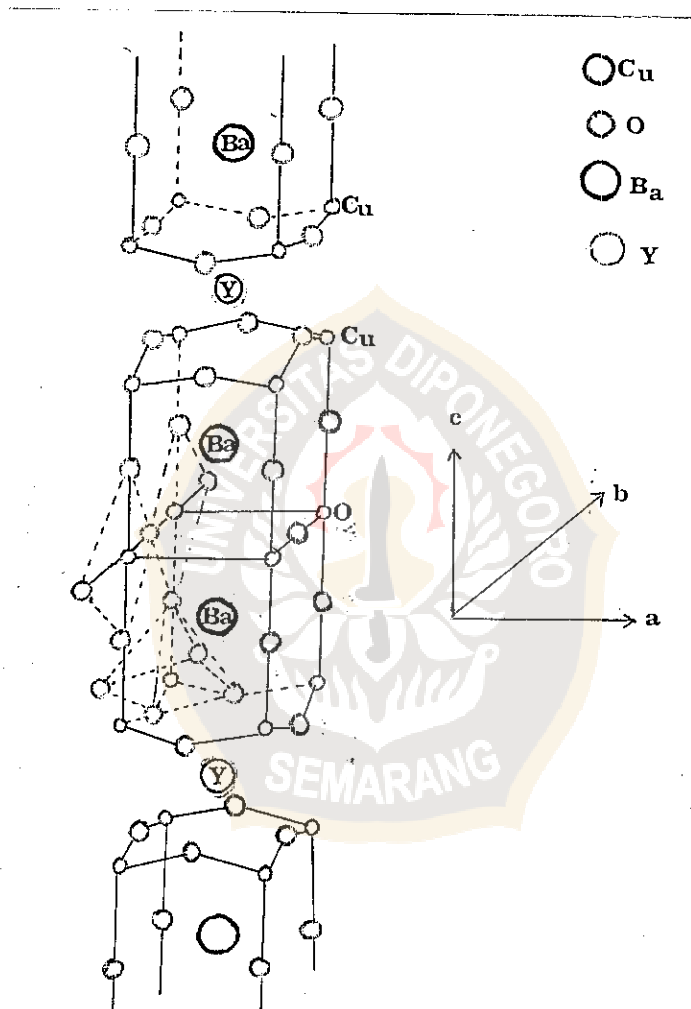
Ditinjau dari sistem material pembentuknya, superkonduktor dapat dikelompokkan menjadi tiga kelompok. Kelompok pertama, adalah superkonduktor yang material penyusunnya logam-logam murni . Superkonduktor ini

mempunyai T_c yang sangat rendah. Kelompok kedua, adalah superkonduktor material penyusunnya alloy, seperti Niobium Zirconium, alloy Niobium Titanium. Salah satu keunggulan superkonduktor tipe ini adalah memiliki medan magnet kritis cukup yang tinggi. Superkonduktor kelompok ketiga, adalah superkonduktor sistem keramik. Contoh superkonduktor kelompok ini antara lain : $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, $La_{2-x}Ba_xCuO_{4-x}$, $Bi(Ca,Sr)_4Cu_3O_x$, $TlCa_2Ba_3Cu_4O_x$.

Struktur kristal Superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ yang akan diteliti rapat arusnya dalam penelitian ini memiliki struktur ortorombik. Sel satuan $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ terdiri atas dua satuan Ba dan satu satuan Y yang tersusun dalam bentuk keteraturan Ba - Y - Ba. Parameter yang penting pada sifat senyawa superkonduktor adalah pengisian oksigen dan juga pengaturan letak oksigen yang nantinya menjadi dasar struktur dari senyawa superkonduktor. (Buckel.W., 1991)

Sistem kristal dari senyawa $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ada dua yaitu tetragonal dan ortorombik. Hanya struktur ortorombiklah yang menunjukkan sifat superkonduktivitas. Sistem kristal ortorombik dari senyawa superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dibentuk dari struktur kristal tetragonal. Pada pemanasan suhu tinggi atau proses sintering sekitar suhu 950°C bahan mempunyai struktur kristal tetragonal karena senyawa superkonduktor banyak kehilangan oksigen pada proses tersebut. Ketika suhu diturunkan sekitar 700°C pada aliran oksigen murni terjadi penambahan oksigen dalam

bahan dan mengakibatkan struktur bahan berubah secara perlahan dari struktur tetragonal kemudian menjadi struktur ortorombik. Struktur Kristal superkonduktor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ fase ortorombik ditunjukkan pada gambar 2.6



Gambar 2.6. Struktur Kristal superkonduktor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ fase ortorombik (Buckel, W., 1991)