

## STUDI KARAKTERISTIK KURVA HISTERISIS SUPERKONDUKTOR $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Wisnu Ari Adi<sup>1</sup>, E. Sukirman<sup>1</sup>, Didin S. W.<sup>1</sup>, S. Purwanto<sup>1</sup> dan Yasuo Yamaguchi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Puslitbang Iptek Bahan (P31B) - BATAN

Kawasan Puspipetek, Serpong, Tangerang 15314

<sup>2</sup>Institute for Material Research, Tohoku University  
Sendai, Japan

### ABSTRAK

**STUDI KARAKTERISTIK KURVA HISTERISIS SUPERKONDUKTOR  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ .** Telah dilakukan pengukuran momen magnetik bahan ( $m$ ) sebagai fungsi suhu ( $T$ ) dan medan magnet luar ( $H$ ) dengan menggunakan *superconducting quantum interference device magnetometer* (SQUID) pada superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . Sampel yang diukur terdiri dari *pellet* hasil *sintering* dan pelelehan. Kurva  $m$ - $T$  digunakan untuk menentukan suhu transisi kritis ( $T_c$ ), sedangkan kurva  $m$ - $H$  digunakan untuk menentukan medan kritis bawah ( $H_{c1}$ ), medan kritis atas ( $H_{c2}$ ), rapat arus kritis ( $J_c$ ), dan gaya *pinning* ( $F_p$ ). Dari hasil analisis kedua kurva tersebut diperoleh estimasi  $T_c$  adalah 90,16 K dan 90,15 K yang berturut-turut untuk sampel hasil *sintering* dan pelelehan.  $H_{c1}$  dan  $H_{c2}$  kedua sampel berturut-turut adalah 1 kOe dan 20 kOe.  $J_c$  ( $H = 0$ ) adalah  $1,88 \times 10^2 \text{ A.cm}^{-2}$ ;  $2,80 \times 10^4 \text{ A.m}^{-2}$ ;  $2,02 \times 10^3 \text{ A.m}^{-2}$ ; dan  $5,70 \times 10^5 \text{ A.cm}^{-2}$  yang berturut-turut untuk sampel YS-2 ( $T = 77 \text{ K}$ ), YS-2 ( $T = 5 \text{ K}$ ), YM-2 ( $T = 77 \text{ K}$ ), dan YM-2 ( $T = 5 \text{ K}$ ). Dan  $F_p$  maksimum adalah  $5,8 \times 10^5 \text{ Nm}^{-3}$  ( $H = 17 \text{ kOe}$ );  $2,1 \times 10^8 \text{ Nm}^{-3}$  ( $H = 17 \text{ kOe}$ );  $5,1 \times 10^6 \text{ Nm}^{-3}$  ( $H = 14 \text{ kOe}$ ); dan  $8,3 \times 10^9 \text{ Nm}^{-3}$  ( $H = 14 \text{ kOe}$ ) yang berturut-turut untuk sampel YS-2 ( $T = 77 \text{ K}$ ), YS-2 ( $T = 5 \text{ K}$ ), YM-2 ( $T = 77 \text{ K}$ ), dan YM-2 ( $T = 5 \text{ K}$ ).

**Kata kunci :** Superkonduktor, momen magnetik, kurva histerisis

### ABSTRACT

**STUDY OF HYSTERESIS CURVE CHARACTERISTIC ON THE  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  SUPERCONDUCTOR.** The measurements of magnetic moment ( $m$ ) on the superconductor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  as function of temperature ( $T$ ) and applied magnetic field ( $H$ ) have been performed by using *superconducting quantum interference device magnetometer* (SQUID). The samples measured consist of pellet from sintering and melting products. The  $m$ - $T$  curve is used to measure critical temperature ( $T_c$ ), and the  $m$ - $H$  curve is used to measure critical field, critical current density, and pinning force. Analysis results of both curves found that  $T_c$  is about 90.16 K and 90.15 K for samples of sintering and melting products, respectively.  $H_{c1}$  and  $H_{c2}$  of both samples are 1 kOe and 20 kOe, respectively.  $J_c$  ( $H = 0$ ) are  $1.88 \times 10^2 \text{ A.cm}^{-2}$ ;  $2.80 \times 10^4 \text{ A.m}^{-2}$ ;  $2.02 \times 10^3 \text{ A.m}^{-2}$ ; and  $5.70 \times 10^5 \text{ A.cm}^{-2}$  for YS-2 ( $T = 77 \text{ K}$ ), YS-2 ( $T = 5 \text{ K}$ ), YM-2 ( $T = 77 \text{ K}$ ), and YM-2 ( $T = 5 \text{ K}$ ) products, respectively. The  $F_p$  maximum are  $5.8 \times 10^5 \text{ Nm}^{-3}$  ( $H = 17 \text{ kOe}$ );  $2.1 \times 10^8 \text{ Nm}^{-3}$  ( $H = 17 \text{ kOe}$ );  $5.1 \times 10^6 \text{ Nm}^{-3}$  ( $H = 14 \text{ kOe}$ ); and  $8.3 \times 10^9 \text{ Nm}^{-3}$  ( $H = 14 \text{ kOe}$ ) for YS-2 ( $T = 77 \text{ K}$ ), YS-2 ( $T = 5 \text{ K}$ ), YM-2 ( $T = 77 \text{ K}$ ), and YM-2 ( $T = 5 \text{ K}$ ), respectively.

**Key words :** Superconductor, magnetic moment, hysteresis curve

### PENDAHULUAN

Bahan superkonduktor suhu transisi kritis tinggi (HTS) memiliki sifat magnetik dan sifat transpor listrik yang berbeda dengan bahan konduktor pada umumnya. Sifat magnetik bahan ini berkaitan erat dengan sifat transpor listriknya. Jadi apabila medan magnet luar diterapkan berubah terhadap waktu maka bahan ini memberikan respon efek perisai yang menolak perubahan medan magnet tersebut. Fenomena ini terjadi apabila suhu  $T < T_c$  (suhu transisi kritis) dan medan magnet yang diterapkan  $H < H_c$  (medan magnet kritis). Dalam keadaan ini bahan bersifat diamagnetik sempurna dan

lazim disebut bahwa bahan ini berada dalam keadaan *Meissner* [1,2].

Salah satu cara untuk mengetahui lebih jauh tentang sifat magnetik bahan ini adalah dengan memahami kurva histerisis dari bahan HTS tersebut. Kurva histerisis ini merupakan data magnetisasi yang diperoleh dari pengukuran momen magnet bahan tersebut akibat imbasan medan magnet luar ( $H$ ). Alat yang biasa digunakan untuk mengukur momen magnet bahan adalah *vibrating sample magnetometer* (VSM) atau *superconducting quantum interference device*

magnetometer (SQUID) [3]. Murakami dan kawan-kawan menggunakan data magnetisasi ini untuk menentukan harga  $T_c$  dan  $J_c$  [3]. Sedangkan Minghu dan kawan-kawan menentukan besarnya *potential pinning* dan dinamika *flux pinning* pada bahan superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  dengan memanfaatkan data magnetisasi tersebut [4].

Dengan menganalisis kurva histerisis ini maka akan dapat diketahui estimasi besarnya suhu transisi kritis ( $T_c$ ), medan kritis bawah ( $H_{c1}$ ), medan kritis atas ( $H_{c2}$ ). Apabila dikombinasikan dengan rumusan *Bean* (*Bean model*) maka dapat diketahui estimasi besarnya rapat arus kritis ( $J_c$ ) bahan, dapat pula untuk mengetahui dinamika *vortex* dan mekanisme *pinning vortex* dalam bahan [1-7]. Jadi tujuan penelitian sekarang adalah memahami sifat magnetik bahan superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  dari hasil analisis kurva histerisis, sehingga diharapkan dapat berguna untuk aplikasinya di masa yang akan datang.

## TEORI

### Medan Magnet Kritis Bawah ( $H_{c1}$ ) dan Atas ( $H_{c2}$ )

Pada tahun 1950 *Vitaly Ginzburg* dan *Lev Landau* pertama kali memperkenalkan teori yang bersifat fenomenologis dan makroskopis untuk superkonduktor tipe I dan tipe II. Mereka memperkenalkan parameter keteraturan sebagai fungsi gelombang kompleks bervariasi terhadap posisi. Dari rumusan *Ginzburg Landau* (GL) dapat diperoleh beberapa konsekuensi penting mengenai karakteristik intrinsik bahan, yaitu : kedalaman penetrasi  $\lambda$ , panjang koherensi  $\xi$ , dan parameter *Ginzburg Landau*  $\kappa$ ,

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi}$$

Saat ini  $\kappa$  ini digunakan sebagai parameter yang membedakan superkonduktor tipe I dan tipe II [2]. Menurut teori GL, superkonduktor tipe II ini memiliki dua jenis medan magnet kritis, yaitu : medan magnet kritis atas  $H_{c2}$ , yang berkaitan dengan harga medan magnet luar maksimum sebelum bahan superkonduktor tersebut beralih ke keadaan normal, dan medan magnet kritis bawah  $H_{c1}$ , yang merupakan batas medan magnet luar yang dapat diberikan sebelum bahan beralih ke keadaan tercampur (*mixed state*).

### Rapat Arus Kritis ( $J_c$ )

Pada tahun 1962, *Charles P. Bean* telah mengajukan suatu model yang berhasil menghubungkan keadaan transpor listrik tanpa disipasi dengan efek histerisis dari proses magnetisasi [3, 6]. Model ini menggunakan asumsi bahwa dengan *pinning* yang kuat dapat terjadi kesetimbangan antara gaya *Lorentz* ( $F_L$ ) dan gaya *pinning* ( $F_p$ ) pada sistem *vortex*. Dalam

keadaan setimbang besarnya arus yang bersangkutan merupakan rapat arus kritis  $J_c$  bahan tersebut.

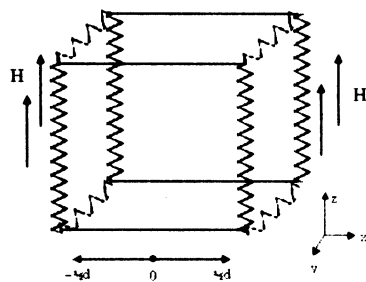
Pada keadaan tercampur (*mixed*) dimana  $H_{c1} < H < H_{c2}$ , setiap fluksoid yang berhasil menerobos ke dalam bahan superkonduktor selalu dibendung oleh perisai arus super ( $J_s$ ). Besarnya  $J_s$  dipengaruhi oleh distribusi rapat medan induksi  $B$  dalam setiap fluksoid sebagaimana yang diungkapkan oleh persamaan *Maxwell*. Pada keadaan ini, arus yang mengalir dalam bahan superkonduktor akan menimbulkan rapat gaya *Lorentz* pada sistem *vortex* yang bergantung pada rapat arus yang bersangkutan :

$$\vec{F}_L = \vec{J}_s \times \vec{B}$$

Secara makroskopik, medan induksi  $B$  efektif yang terdapat di dalam bahan ditentukan oleh distribusi fluksoid dalam bahan bersangkutan. Distribusi fluksoid tersebut pada umumnya tidak merata, sehingga menghasilkan  $B$  yang bervariasi pula terhadap posisi. Dalam keadaan setimbang yang diisyaratkan oleh hubungan  $F_L = F_p$ , maka rapat arus super  $J_s$  merupakan rapat arus kritis  $J_c$  sebagai batas maksimum rapat arus super dengan gaya *Lorentz*  $F_L$  yang masih diimbangi oleh gaya *pinning*  $F_p$ .

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}_c \quad \dots\dots\dots(1)$$

Berdasarkan pengertian ini, maka dapat ditentukan harga  $J_c$  dari hasil pengukuran medan magnet induksi  $B$  (data magnetisasi). Untuk mempermudah pemahaman ini maka tinjaulah *bulk* superkonduktor berbentuk papan dengan ketebalan  $d$  dalam medan magnet uniform dengan syarat batas  $B = \mu_0 H$  pada  $x = -\frac{1}{2}d$  dan  $x = \frac{1}{2}d$ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Geometri *bulk* superkonduktor

Dengan demikian medan induksi efektif, sehingga persamaan (1) dapat disederhanakan menjadi :

$$\frac{dB(x)}{dx} = \mu_0 \vec{J}_c, \quad -\frac{1}{2}d < x < \frac{1}{2}d \quad \dots\dots\dots(2)$$

Magnetisasi didefinisikan sebagai :

$$\mu_0 M = B - \mu_0 H \quad \dots\dots\dots(3)$$

Dimana :  
 $H$  adalah medan magnet luar (terpasang).

$$\mu_0 M = \frac{\int (B - \mu_0 H) dV}{\int dV}$$

Dalam hal ini, magnetisasi merupakan momen

$$\mu_0 M = \left(\frac{1}{d}\right) \int (B - \mu_0 H) dx \quad \dots\dots\dots(4)$$

magnet bahan per satuan volume, sehingga persamaan (3) menjadi sesuai syarat batas yang dikemukakan pada persamaan (2) maka :

$$\mu_0 M^+ = -\frac{1}{4} \mu_0 Jc \cdot d \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\mu_0 M^- = \frac{1}{4} \mu_0 Jc \cdot d \quad \dots\dots\dots(6)$$

Dari persamaan (2) dan persamaan (4) akan diperoleh persamaan untuk proses magnetisasi ( $M^+$ ) dan demagnetisasi ( $M^-$ ) pada medan terpasang, berturut-turut adalah sebagai berikut :

Jadi estimasi harga  $Jc$  dapat dihitung dari persamaan (5) dan (6) sebagai berikut :

$$\mu_0 (M^- - M^+) = \frac{1}{2} \mu_0 Jc \cdot d$$

$$Jc = \frac{2\Delta M}{d} \quad \dots\dots\dots(7)$$

Ungkapan di atas menunjukkan bahwa proses demagnetisasi tidak banyak berpengaruh terhadap sampel bersangkutan, sehingga estimasi harga  $Jc$  dapat dilakukan secara mudah dan cepat untuk sampel yang berukuran tidak terbatas.

**Dinamika dan Mekanisme *Pinning Vortex***

Setiap fluksoid yang berhasil menerobos ke dalam bahan superkonduktor ini dalam keadaan tercampur (*mixed*) selalu dibendung oleh arus perisai (*screening current*) yang mengelilinginya tanpa disipasi. Dengan demikian terjadi lokalisasi fluksoid secara lateral dengan nilai kuantisasi yang tetap yaitu,

$$\phi_0 = h/2e = 2,0678 \times 10^{-15} \text{ weber}$$

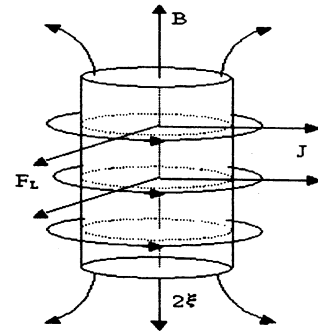
dimana  $h$  adalah konstanta Plank dan  $e$  adalah muatan elektron. Pada keadaan ini, arus yang mengalir dalam bahan superkonduktor akan menimbulkan rapat gaya Lorentz ( $F_L$ ) pada sistem *vortex* yang bergantung pada rapat arus yang bersangkutan,

$$F_L = \vec{J} \times \vec{B} = \vec{J} \times n_v \phi_0 \hat{n} \quad \text{dan} \quad \vec{B} = n_v \phi_0$$

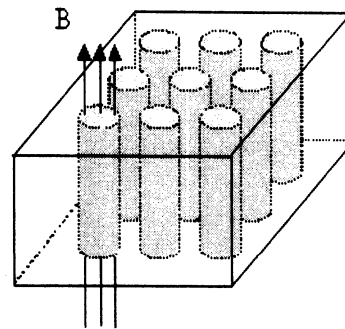
dimana  $J$ ,  $B$ ,  $n_v$ , dan  $\phi_0$  berturut-turut adalah rapat arus, medan magnet, rapat *vortex* persatuan luas, dan *flux quantum* seperti yang terlihat pada Gambar 2. Akibatnya, *vortex* dalam keadaan bebas ini akan menimbulkan transpor listrik yang disipatif, sehingga gerakan *vortex* ini perlu dicegah. Untuk

itu diperlukan *pinning* untuk mencegah gerak *vortex* ini. Gaya *pinning* ini dapat dihitung melalui persamaan  $F_p = Jc H$ , dimana  $H$  adalah kuat medan magnet yang terpasang [4, 7-9].

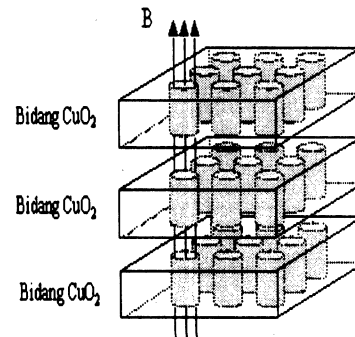
Superkonduktor tipe II konvensional (STK) memiliki sistem *vortex* yang terdistribusi secara periodik yang berbentuk turbular atau kolomnar dalam kerangka kisi heksagonal dengan struktur dasar segitiga *Abrikosov*, seperti tampak pada Gambar 3. Namun berlainan dengan bahan HTS, karena memiliki impuritas, pada umumnya terdapat ketidaktertiban pada strukturnya, sehingga sistem *vortex* yang terbentuk mengandung ketidaktertiban pula. Walaupun demikian, pada medan magnet dan suhu yang rendah, sistem *vortex* ini masih memiliki periodisitas berskala besar. Karena sifatnya yang anisotropik, maka *vortex* ini akan terlokalisasi



Gambar 2. *Vortex* tunggal [11]

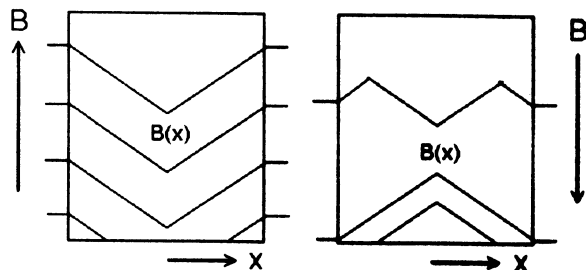


Gambar 3. *Vortex* STK [11]



Gambar 4. *Vortex* HTS [11]

di sekitar bidang-bidang konduksi  $\text{CuO}_2$ , seperti yang terlihat pada Gambar 4. Secara umum, dinamika gerak *vortex* dalam HTS sangat kompleks, karena munculnya faktor-faktor baru yang berkaitan dengan sifat elastik, pengaruh termal, gaya Lorentz, dan gaya *pinning* [3, 7].



Gambar 5. Deskripsi mekanisme proses magnetisasi dan demagnetisasi untuk kurva  $B - d$  [1, 6]

### Kurva Histerisis

Kurva histerisis menunjukkan deskripsi mekanisme proses magnetisasi dan demagnetisasi. Skenario untuk proses magnetisasi dan demagnetisasi akibat imbasan medan magnet luar dalam setiap keadaan kritis ditunjukkan pada Gambar 5.

Tampak dalam gambar tersebut bahwa pola distribusi medan induksi  $B$  yang cenderung menurun ke bagian dalam bahan, sesuai dengan gradien maksimum

$$\left( \frac{dB(x)}{dx} \right)$$

dari distribusi *vortex* yang dapat diimbangi oleh gaya *pinning*. Kemiringan  $B(x)$  tidak berubah dengan bertambahnya medan luar  $H$ , walaupun terjadi penambahan jumlah *vortex* dalam bahan. Hal ini berarti bahwa *vortex* yang bertambah akan menyebar ke dalam pusat bahan dan menjauhi permukaan sampai tercapai keadaan setimbang  $\bar{F}_p = \bar{F}_L$

Dengan peningkatan medan magnet luar lebih lanjut yang melebihi medan kritis bawah dimana gaya *pinning* maksimum, maka akan terjadi penetrasi (penembusan) total, dan ini berarti bahwa *vortex* akan mengisi seluruh daerah bahan. Sedangkan untuk proses demagnetisasi yang seiring dengan penurunan medan magnet luar  $H$ , medan induksi  $B$  akan meningkat dengan kemiringan yang sama seperti sebelumnya di daerah sekitar permukaan bahan. Apabila medan luar  $H$  diturunkan kembali, maka kedalaman penetrasi  $\lambda$  akan semakin berkurang dengan kemiringan  $B(x)$  tetap. Dengan demikian sebagai akibatnya *vortex* akan bergerak keluar hingga permukaan sampel, dan bahan kembali pada keadaan *Meissner*. Di akhir proses ini, ternyata masih menyisakan

medan induksi  $B$  di dalam bahan walaupun medan magnet luar sudah menjadi nol. Hal ini menunjukkan bahwa *vortex* yang sudah terbentuk akibat penetrasi medan magnet dalam proses magnetisasi, akan tetap terperangkap di dalam bahan selama proses demagnetisasi.

### METODE PERCOBAAN

Sampel superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  dibuat melalui reaksi padatan dengan mencampurkan oksida-oksida penyusun, yaitu :  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ , dan  $\text{CuO}$  dengan perbandingan stoikiometri unsur  $\text{Y} : \text{Ba} : \text{Cu} = 1 : 2 : 3$ . Hasil pencampuran tersebut dikalsinasi pada suhu  $900^\circ\text{C}$  selama 4 jam, setelah itu dicetak dalam bentuk pelet (sampel silinder) dengan tekanan 2000 p.s.i sebanyak 4 buah, 2 buah berukuran  $d$  (tebal) = 2 mm dan  $D$  (diameter) = 21 mm selanjutnya disebut sampel YS-1 dan YM-1, sedangkan 2 buah berikutnya berukuran  $d = 1,5$  mm dan  $D = 6$  mm yang selanjutnya disebut dengan sampel YS-2 dan YM-2. Sampel-sampel yang telah dicetak *disinter* pada suhu  $940^\circ\text{C}$  selama 10 jam di dalam aliran udara biasa [10]. Kemudian sampel YM-1 dan YM-2 diproses dengan pelelehan. Metode yang digunakan adalah Modifikasi *Melt Texture Growth* (MTG). Langkah-langkah proses pelelehan tersebut adalah sebagai berikut: kedua sampel tadi dipanaskan pada suhu  $1100^\circ\text{C}$  dengan laju  $450^\circ\text{C}/\text{jam}$  dan ditahan selama 12 menit kemudian diturunkan secara cepat pada suhu  $1000^\circ\text{C}$ . Selanjutnya suhu diturunkan kembali secara perlahan-lahan (*slow cooling*) sampai  $900^\circ\text{C}$  dengan laju  $10^\circ\text{C}/\text{jam}$  [11].

Nama Sampel	Diameter (mm)	Tebal (mm)	Proses	Digunakan untuk
YS-1	21	2	Sintering	Uji Efek Meissner
YS-2	6	1,5	Sintering	Uji Sifat Magnet
YM-1	21	2	Pelelehan	Uji Efek Meissner
YM-2	6	1,5	Pelelehan	Uji Sifat Magnet

Kedua jenis sampel ini baik hasil proses *sintering* (sampel YS-1 dan YS-2) maupun proses pelelehan (sampel YM-1 dan YM-2) tadi diuji sifat *Meissner*-nya dengan cara : sampel diletakkan di atas permukaan magnet permanen pada suhu nitrogen cair ( $T = 77\text{ K}$ ). Apabila sampel melayang di atas permukaan magnet tersebut, berarti bahan tersebut diindikasikan sebagai bahan superkonduktor dan begitu sebaliknya. Kemudian sampel YS-2 dan YM-2 diukur sifat magnetnya dengan menggunakan magnetometer SQUID. Pengukuran ini dilakukan di Universitas Tohoku, Sendai, Jepang. Alat ini bekerja berdasarkan metode induksi, yaitu magnetisasi diukur dari sinyal yang ditimbulkan atau diinduksikan oleh sampel yang bergetar dalam lingkungan medan magnet pada sepasang kumparan. Apabila sampel termagnetisasi atau sebagai respon dari

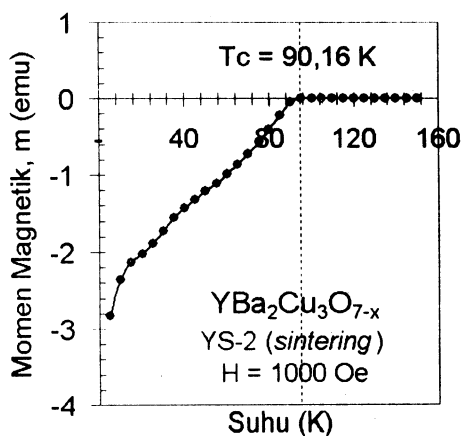
adanya medan magnet luar, maka getaran ini akan mengakibatkan perubahan garis gaya magnetik. Perubahan ini diinduksikan menjadi sebuah tegangan, kemudian tegangan ini dikonversi dan dikalibrasi menjadi data magnetisasi [12]. Sampel diukur pada suhu  $T = 5\text{ K}$  dan  $T = 77\text{ K}$  (nitrogen cair) dalam rentang medan magnet luar  $H$  dari 0 sampai 20 kOe.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Efek Meissner dan Suhu Transisi Kritis ( $T_c$ )

Salah satu cara untuk mengetahui sifat superkonduktivitas bahan adalah dengan melakukan pengujian efek *Meissner* dan pengukuran suhu transisi kritis ( $T_c$ ). Mula-mula sampel YS-1, YS-2, YM-1, dan YM-2 direndam ke dalam nitrogen cair selama 10 menit. Hal ini dilakukan agar suhu di dalam sampel diharapkan sama dengan suhu nitrogen cair sebesar  $T = 77\text{ K}$ . Kemudian magnet permanen diletakkan di atas permukaan sampel-sampel tersebut. Ternyata magnet tersebut melayang di atas permukaan sampel. Hal ini menunjukkan bahwa fluk medan magnet yang diterapkan tidak dapat menembus ke dalam sampel (*total flux extrusion*). Pada kondisi ini sampel bersifat diamagnetik sempurna sehingga sebagai indikasi awal bahwa sampel ini merupakan bahan superkonduktor. Namun penolakan fluk secara total ini hanya terjadi pada suhu  $T < T_c$ .  $T_c$  dari sampel YS-2 dan YM-2 dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7 yang berturut-turut adalah 90,16 K dan 90,15 K.

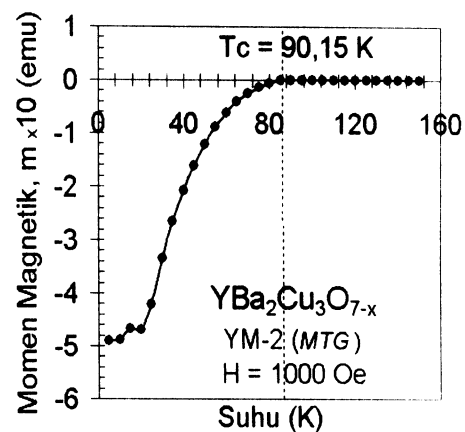
Gambar 6 dan Gambar 7 merupakan kurva  $T_c$  berdasarkan data magnetisasi yang berturut-turut untuk sampel YS-2 dan YM-2. Pada gambar tersebut terlihat bahwa apabila suhu dinaikkan maka momen magnetik bahan semakin kecil. Dan momen magnetik hampir mendekati nol pada batas suhu tertentu (awal daerah *plateau*). Apabila suhu terus dinaikkan maka momen magnetik mengalami kondisi saturasi  $dM/dT$  (mendekati nol). Batas daerah suhu ini disebut



Gambar 6. Kurva  $m - T$  pada sampel YS-2.

dengan suhu transisi kritis ( $T_c$ ), yaitu suhu dimana terjadi perubahan (transisi) dari bahan superkonduktor menjadi bahan resistif. Pada hakekatnya setiap bahan memiliki momen magnetik apabila ditempatkan di dalam lingkungan medan magnet.

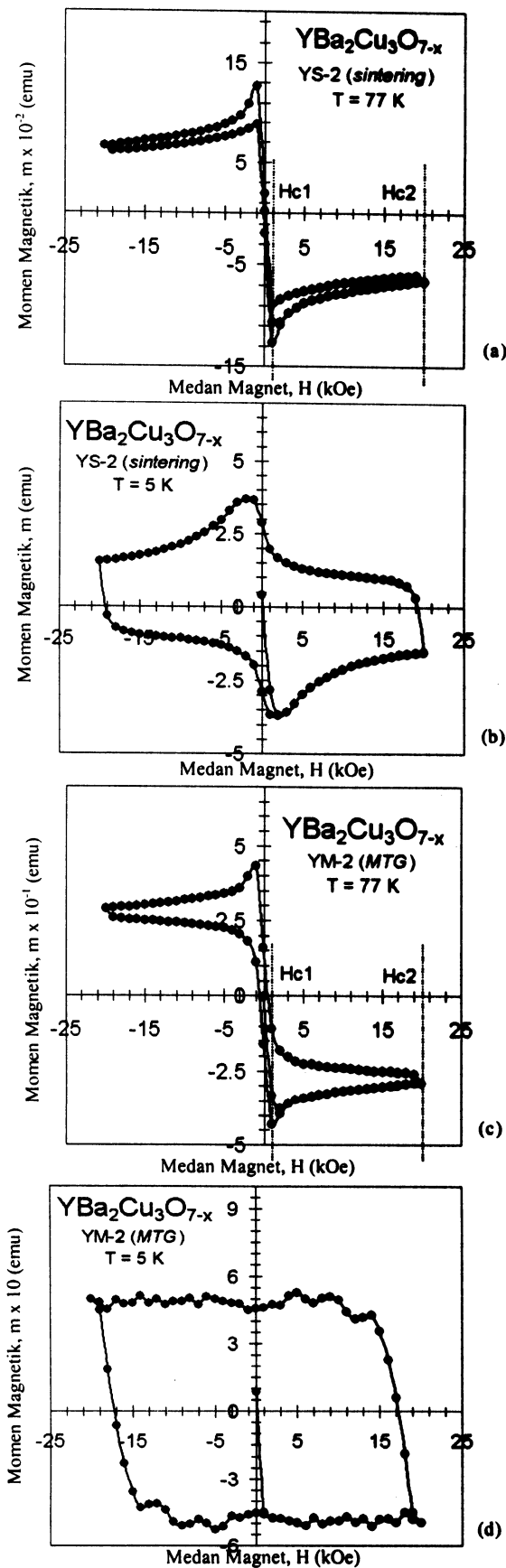
Momen magnetik per unit volum disebut dengan magnetisasi. Bahan yang mempunyai sifat magnetik cenderung memiliki momen magnetik yang cukup besar dibandingkan dengan bahan non magnetik. Perbedaan momen magnetik ini dapat dilihat pada saat terjadinya perubahan sifat bahan, yaitu pada suhu  $T < T_c$  bahan bersifat diamagnetik yang ditandai dengan nilai momen magnetik cukup besar, sedangkan pada suhu  $T > T_c$  bahan bersifat resistif (non magnetik) yang ditandai dengan nilai momen magnetik sangat kecil.



Gambar 7. Kurva  $m - T$  pada sampel YM-2.

Pada Gambar 6 dan Gambar 7 juga diperlihatkan bahwa jumlah momen magnetik semakin berkurang dengan meningkatnya suhu. Berdasarkan pada teori *Bardeen Cooper Schrieffer* (BCS) bahwa apabila pada bahan tersebut diterapkan medan magnet sebesar  $H$  maka

hal ini juga berarti pemberian energi sebesar  $\int_0^H \mu_0 M dH$  kepada bahan tersebut [2]. Sedangkan besarnya energi kinetik pasangan elektron yang sering disebut dengan *pair interaction energy*, yaitu energi yang diperlukan untuk pembentukan pasangan elektron (pada superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  disebut dengan *cooper pair*) sangat bergantung pada suhu [13]. Apabila suhu  $T$  jauh di bawah  $T_c$  maka besarnya *pair interaction energy* ini akan semakin kuat. Dan apabila suhu  $T$  mendekati harga  $T_c$  maka besarnya *pair interaction energy* ini akan semakin lemah. Pada akhirnya besarnya energi eksternal ini akan melebihi besarnya *pair interaction energy*, sehingga energi eksternal ini yang membawa bahan tersebut keluar dari keadaan superkonduksi. Dengan kata lain bahwa energi ini sama dengan energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron yang berpasangan (*depairing*) menjadi elektron normal.

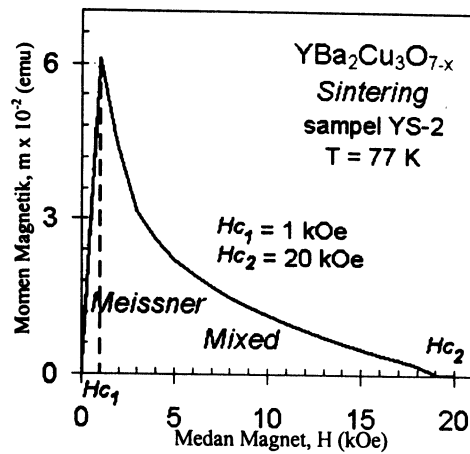


Gambar 8. Kurva Histerisis m - H untuk sampel :  
 (a) YS-2 diukur pada T = 77 K, (b) YS-2 diukur pada T = 5 K  
 (c) YM-2 diukur pada T = 77 K, (d) YM-2 diukur pada T = 5 K

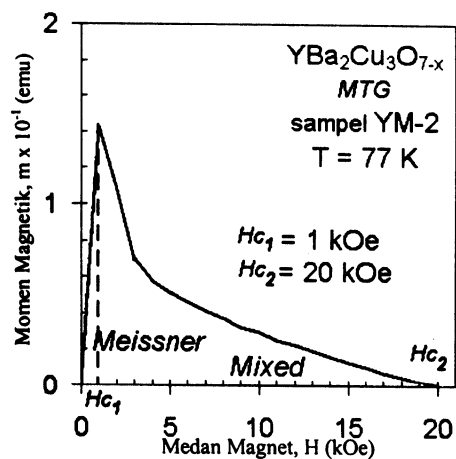
### Medan Magnet Kritis Bawah ( $H_{c1}$ ), Atas ( $H_{c2}$ ), dan Rapat Arus Kritis ( $J_c$ )

Gambar 8 merupakan kurva histerisis sampel YS-2 dan YM-2 yang diukur masing-masing pada suhu 5 K dan 77 K.

Untuk lebih jelasnya, penentuan  $H_{c1}$  dan  $H_{c2}$  dapat dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10.



Gambar 9. Kurva magnetisasi terhadap medan magnet sampel YS-2 yang diukur pada suhu T = 77 K



Gambar 10. Kurva magnetisasi terhadap medan magnet sampel YS-2 yang diukur pada suhu T = 77 K

Pada Gambar 9 dan Gambar 10 tampak bahwa pada daerah medan magnet di bawah  $H_{c1}$ , superkonduktor berada dalam keadaan *Meissner* yang bersifat diamagnetik sempurna. Dan pada daerah  $H_{c1} < H < H_{c2}$ , sebagian *flux* medan magnet luar  $H$  sudah memasuki bahan superkonduktor dalam bentuk fluksoid. Kehadiran fluksoid ini mengakibatkan medan magnet induksi bahan  $B$  tidak bernilai nol dan bahan masih bersifat superkonduktif. Superkonduktor akan beralih menjadi bahan resistif saat  $H > H_{c2}$  yang ditandai oleh penetrasi *flux* medan magnet luar  $H$  ke dalam superkonduktor secara menyeluruh (*total penetration*).

Estimasi harga  $J_c$  pada setiap keadaan medan magnet terpasang ( $H$ ) dapat diperoleh berdasarkan perhitungan data magnetisasi (Gambar 8) dan menggunakan persamaan (7) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11. Data magnetisasi pada Gambar 8 dalam satuan momen magnetik  $m$  (emu).

Tabel 1. Faktor koreksi dari satuan cgs menjadi SI [14]

Kuantitas	Simbol	cgs	Faktor konversi	SI
Momen magnetik	$m$	emu atau erg.Gauss <sup>-1</sup>	$10^{-3}$	A.m <sup>2</sup> Joule.Tesla <sup>-1</sup>
Magnetisasi (volume)	$M$	emu.cm <sup>-3</sup>	$10^3$	A.m <sup>-1</sup>
Rapat arus kritis	$J_c$	Emu.cm <sup>-2</sup>	$10^3$	A.m <sup>-2</sup>

Data tersebut dikonversikan terlebih dahulu ke dalam data magnetisasi  $M$  (emu/cm<sup>3</sup>) (Tabel 1) dengan cara data tersebut dibagi dengan volume sampel (Tabel 2), kemudian satuan cgs dikonversikan kembali menjadi satuan SI. Dengan menggunakan persamaan (7) dapat kita peroleh estimasi harga  $J_c$  dalam satuan (A.cm<sup>-2</sup>).

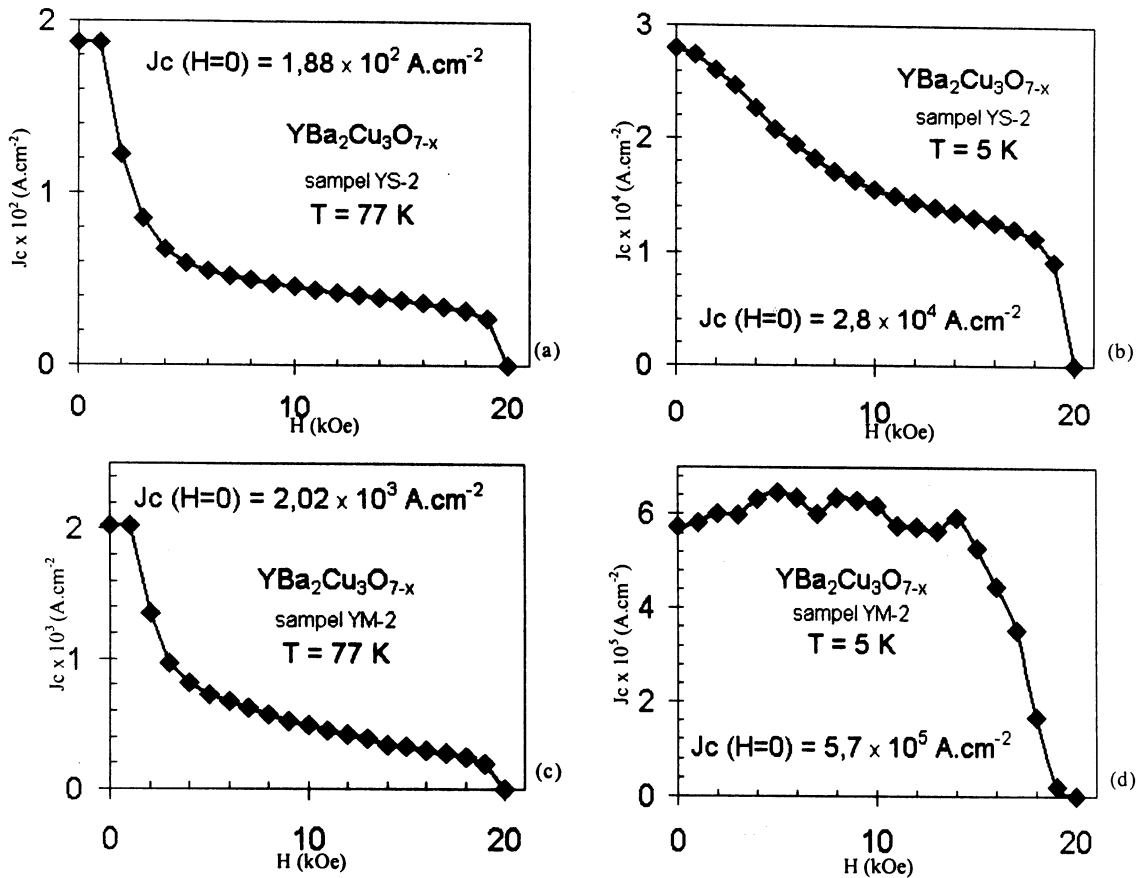
Tabel 2. Dimensi sampel

Sampel	Diameter	tebal	Volume
YS-2	6 mm	1,45 mm	$4,0977 \times 10^{-2}$ cm <sup>3</sup>
YM-2	6 mm	1,12 mm	$3,1651 \times 10^{-2}$ cm <sup>3</sup>

Gambar 11 merupakan kurva ketergantungan rapat arus kritis ( $J_c$ ) terhadap medan magnet luar ( $H$ ) pada setiap keadaan medan magnet terpasang ( $H$ ) yang diukur pada suhu  $T=5$  K dan 77 K. Tampak pada Gambar tersebut bahwa  $J_c$  akan menurun seiring dengan meningkatnya medan magnet luar ( $H$ ). Seperti yang telah dijelaskan pada pengukuran suhu transisi kritis ( $T_c$ ) bahwa berdasarkan pada teori Bardeen Cooper Schrieffer (BCS) bahwa apabila pada bahan tersebut diterapkan medan magnet sebesar  $H$  maka hal ini juga

berarti pemberian energi sebesar  $\int_0^H \mu_0 M dH$  kepada bahan tersebut. Penambahan energi ini (peningkatan medan magnet  $H$  selanjutnya) pada akhirnya membawa bahan tersebut keluar dari keadaan superkonduksi.

Jadi energi ini sama dengan energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron yang berpasangan



Gambar 11. Kurva  $J_c - H$ :

(a) sampel YS-2 pada  $T = 77$  K, (b) YS-2 pada  $T = 5$  K, (c) sampel YM-2 pada  $T = 77$  K, (d) YM-2 pada  $T = 5$  K

(*depairing*) menjadi elektron normal. Dengan kata lain bahwa energi ini sebanding dengan selisih energi bebas antara keadaan superkonduksi dengan keadaan normal. Selain itu, ada pula faktor lain yang menyebabkan  $J_c$  ini berkurang pada saat medan magnet  $H$  diperbesar, yaitu adanya pergerakan *vortex* dalam bahan.

Estimasi harga  $J_c$  ( $H = 0$ ) untuk sampel YS-2 (hasil proses *sintering*) adalah  $1,88 \times 10^2 \text{ A.cm}^{-2}$  dan

$2,80 \times 10^4 \text{ A.m}^{-2}$  yang diukur berturut-turut pada suhu  $T = 77 \text{ K}$  dan  $T = 5 \text{ K}$ . Dan sampel YM-2 (hasil proses pelelehan) adalah  $2,02 \times 10^3 \text{ A.m}^{-2}$  dan  $5,70 \times 10^5 \text{ A.cm}^{-2}$  yang diukur berturut-turut pada suhu  $T = 77 \text{ K}$  dan  $T = 5 \text{ K}$ .

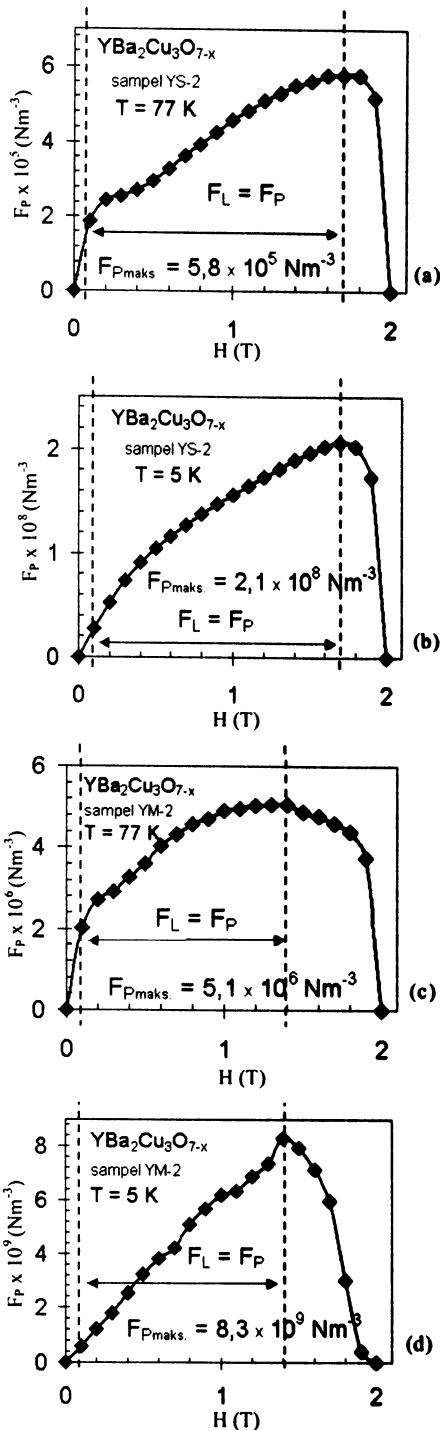
Gambar 12 merupakan kurva pengaruh gaya pinning  $F_p$  terhadap peningkatan medan magnet  $H$  yang diukur pada suhu  $T = 77 \text{ K}$  dan  $T = 5 \text{ K}$  untuk sampel YS-2 dan YM-2. Pada Gambar 12 (a) dan Gambar 12 (b) terlihat bahwa untuk sampel YS-2 (hasil proses *sintering*), rapat gaya Lorentz ( $F_L$ ) akibat adanya arus yang mengalir dalam bahan pada kondisi tercampur (*mixed state*) masih dapat diimbangi oleh gaya pinning ( $F_p$ ) dari bahan yang terjadi pada batas medan magnet  $H = 0,1 \text{ T}$  sampai  $H = 1,7 \text{ T}$ . Sedangkan pada Gambar 12 (c) dan Gambar 12 (d) terlihat bahwa untuk sampel YM-2 (hasil proses pelelehan), rapat gaya Lorentz ( $F_L$ ) akibat adanya arus yang mengalir dalam bahan pada kondisi tercampur (*mixed state*) masih dapat diimbangi oleh gaya pinning ( $F_p$ ) dari bahan yang terjadi pada batas medan magnet  $H = 0,1 \text{ T}$  sampai  $H = 1,4 \text{ T}$ . Hal ini berarti bahwa pada kondisi ini  $F_L = F_p$ .

Berkaitan dengan Gambar 11, harga  $J_c$  masih dapat dipertahankan sampai batas  $H = 0,1 \text{ T}$  kemudian  $J_c$  turun seiring dengan meningkatnya medan magnet terpasang  $H$ . Pada  $H \leq 0,1 \text{ T}$  fluks medan magnet tidak dapat menembus bahan (bersifat diamagnetik sempurna) sehingga pengaruh pergerakan *vortex* ini belum ada. Sedangkan pada  $H > 0,1 \text{ T}$  sebagian *flux* medan magnet berhasil menembus ke dalam bahan sehingga pada kondisi ini pergerakan *vortex* sangat mungkin terjadi. Pergerakan *vortex* ini masih bisa dipertahankan sampai pada batas  $F_p$  maksimum. Selanjutnya  $J_c$  menurun secara cepat ke titik nol. Hal ini menunjukkan bahwa *vortex* sudah dalam keadaan bebas bergerak sehingga menimbulkan medan listrik yang searah dengan rapat

arus berdasarkan Hukum Faraday  $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ . Kehadiran medan listrik inilah yang mengakibatkan transport listrik yang bersifat disipatif sebagaimana yang diungkapkan oleh rumus Daya  $P = \vec{E} \cdot \vec{j}$ , sehingga pada akhirnya kedua sampel ini bukan lagi bersifat superkonduktif.

## KESIMPULAN

Kurva histerisis bahan superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  diperoleh dari hasil pengukuran momen magnetik sebagai fungsi medan magnet luar ( $H$ ) dengan menggunakan *superconducting quantum interference device magnetometer* (SQUID) dan disajikan dalam Gambar 8. Dari hasil analisis kurva histerisis ini dapat diketahui estimasi harga suhu transisi kritis ( $T_c$ ) yaitu  $90,16 \text{ K}$  dan  $90,15 \text{ K}$  yang berturut-turut untuk sampel hasil proses *sintering* dan pelelehan, medan kritis bawah ( $H_{c1}$ ) sebesar  $1 \text{ kOe}$ , dan medan kritis atas ( $H_{c2}$ ) sebesar



Gambar 12. Kurva  $F_p - H$ :  
 (a) sampel YS-2 pada  $T = 77\text{K}$ , (b) YS-2 pada  $T = 5\text{K}$ ,  
 (c) sampel YM-2 pada  $T = 77\text{K}$ , (d) YM-2 pada  $T = 5\text{K}$



20 kOe untuk kedua jenis sampel. Rapat arus kritis  $J_c$  ( $H = 0$ ) dapat dihitung berdasarkan rumusan model dari Bean yaitu untuk sampel hasil proses sintering adalah  $1,88 \times 10^3 \text{ A.cm}^{-2}$  pada suhu  $T = 77 \text{ K}$  dan  $2,80 \times 10^4 \text{ A.m}^{-2}$  pada suhu  $T = 5 \text{ K}$ , dan untuk sampel hasil proses pelelehan adalah  $2,02 \times 10^3 \text{ A.m}^{-2}$  pada suhu  $T = 77 \text{ K}$  dan  $5,70 \times 10^5 \text{ A.cm}^{-2}$  pada suhu  $T = 5 \text{ K}$ . Model ini beranggapan bahwa dengan pinning yang kuat terdapat keseimbangan antara gaya Lorentz dan gaya pinning pada sistem vortex. Rapat gaya pinning maksimum untuk sampel hasil proses sintering adalah  $5,8 \times 10^5 \text{ Nm}^{-3}$  ( $H = 17 \text{ kOe}$ ) pada suhu  $T = 77 \text{ K}$  dan  $2,1 \times 10^8 \text{ Nm}^{-3}$  ( $H = 17 \text{ kOe}$ ) pada suhu  $T = 5 \text{ K}$ , dan untuk sampel hasil proses pelelehan adalah  $5,1 \times 10^6 \text{ Nm}^{-3}$  ( $H = 14 \text{ kOe}$ ) pada suhu  $T = 77 \text{ K}$  dan  $8,3 \times 10^9 \text{ Nm}^{-3}$  ( $H = 17 \text{ kOe}$ ) pada suhu  $T = 5 \text{ K}$ .

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Drs. Gunandjar, S.U. selaku Kepala Puslitbang Iptek Bahan atas dukungannya dalam kegiatan ini, kepada DR. Ridwan selaku Kepala Bidang Bahan Maju P3IB BATAN yang telah memberikan kesempatan untuk penelitian, kepada mendiang DR. Wuryanto, atas perjuangannya membangun kelompok Superkonduktor, Dra. Grace Tj. Sulungbudi, M.Sc. selaku anggota kelompok superkonduktor dan semua pihak yang telah membantu dalam kelancaran penulisan makalah ini.

## DAFTAR ACUAN

- [1]. MOON, F.C., *Superconducting Levitation*, John Wiley & Sons, Inc., New York, (1994), 73-105.
- [2]. ROSE-INNES, A.C., RHODERICK, E.H., *Introduction to Superconductivity*, Pergamon Press, Oxford, (1969), 92-110.
- [3]. MURAKAMI, M., *Supercond. Sci. Technol.* **5** (1992), 185-203.
- [4]. MINGHU, F., GANGJIN, H., MENG, C., ZHENKUAN, J., QIRUI, Z., *Solid State Communications*, **89** (2), (1994), 93-95.
- [5]. *Research Instruments, Technical Bulletin Vibrating Sample Magnetometry, Review of the Technique*, Oxford Instruments, Scientific Research Division, (1991).
- [6]. BEAN, C.P., *Phys. Rev. Lett.* **8**, (1962), 250.
- [7]. WISNU ARI ADI, E. SUKIRMAN, DIDIN S.W., GRACE Tj. S. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **3**, (1), Oktober (2001), 38-44.
- [8]. ROGER WORDENWEBER, *Rep. Prog. Phys.*, **62**, (1999), 187-236.
- [9]. PUZNIAK, R., WISNIEWSKI, A., DOYLE, T.B., *Physica B* 284-288, 2000, (887-888).
- [10]. SUKIRMAN, E., "Pengaruh Distribusi Kekosongan Oksigen pada Superkonduktivitas  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ", Thesis Master Fakultas Pasca Sarjana Universitas Indonesia, (1991).
- [11]. DIDIN S. WINATAPURA, WISNU ARI ADI, GRACE Tj. SULUNGBUDI, ENKIR SUKIRMAN, *Prosiding Pertemuan Ilmiah Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bahan 2002*, Serpong, 22-23 Oktober (2002), 168-172.
- [12]. MUJAMILAH, RIDWAN, MUSLICH, M.R., PURWANTO, S., FEBRI, M.I.M., YOHANNES, A.M., SANTOSO, E., MUGIRAHARDJO, H., *Vibrating Sample Magnetometer (VSM) tipe Oxford VSM1.2H*, Seminar Nasional Bahan Magnet, Serpong, 11 Oktober (2000).
- [13]. BUCKEL, W., *Superconductivity*, VCH Publisher Inc., New York, (1991), 112-159.
- [14]. *Unit for Magnetic Properties, Measurement and Control Technologies*, Lake Shore Cryotronics, Inc., (1989).
- [15]. JIN, S., DAVIS, M.E., TIEFEL, T.H., VAN DOVER, R.B., SHERWOOD, R.C., O'BRYAN, H.M., KAMMLOTT, G.H., FASTNACHT, R.A., *Appl. Phys. Lett.* **54** (25), June 19, (1989), 2605-2608.
- [16]. VANDER MAAS, J., GASPAROV, V.A., PAVUNA, D., *Nature* **328**, August 13, (1987), 603.
- [17]. WISNU ARI ADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA, "Kontak Listrik Resistivitas Rendah pada Bulk Superkonduktor Keramik Tc Tinggi Sistem  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ", *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **1** (3), Juni (2000).
- [18]. KIM, Y.B., HEMPSTEAD, C.F., STRAND, A.R., *Phys. Rev.* **129**, (1963), 528.
- [19]. SAUERZOPF, F.M., WIESINGER, H.P., WEBER, H.W., *Cryogenics* **30** (1990), 650.
- [20]. JIN, S., TIEFEL, T.H., NAKAHAR, S., GRAEBNER, J.E., O'BRYAN, H.M., FASTNACHT, R.A., KAMMLOTT, G.W., *Appl. Phys. Lett.* **56** (13), 26 March (1990).
- [21]. SHIYING DING, ZHENG YU, JIALIE YAN, YITONG CHANG, LOU MO, XIN JING, HONG TAO, REN, QING HE, LING XIA, RUKUN WANG, *Supercond. Sci. Technol.* **4**, (1991), S271-273.
- [22]. MURAKAMI, M., MORITA, M., DOI, K., MIYAMOTO, K., *Japanese Journal of Applied Physics*, **28**, (7), July (1989), 1189-1194.
- [23]. KRABBES, G., SCHATZLE, P., BIEGER, W., WIESNER, U., STOVER, G., WU, M., STRASSER, T., KOHLER, A., LITZKENDORF, D., FISCHER, K., GORNERT, P., *Physica C* **244**, (1995), 145-152.