

## KARAKTERISTIK PENYUSUTAN RAPAT ARUS KRITIS $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ DALAM LINGKUNGAN MEDAN MAGNET

Wisnu Ari Adi, E. Sukirman, Didin S. Winatapura dan Yustinus P.

Puslitbang Iptek Bahan (P3IB) - BATAN  
Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang

### ABSTRAK

**KARAKTERISTIK PENYUSUTAN RAPAT ARUS KRITIS  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  DALAM LINGKUNGAN MEDAN MAGNET.** Karakteristik penyusutan rapat arus kritis ( $J_c$ ) superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  hasil proses pelelehan telah diteliti. Penghitungan  $J_c$  sampel dilakukan dengan mengukur momen magnetik bahan menggunakan *Superconducting Quantum Interference Device* (SQUID) dalam rentang medan magnet luar ( $H$ ) dari 0 kOe sampai dengan 20 kOe pada suhu 5 K dan 77 K. Suhu transisi kritis  $T_c$  cuplikan adalah 90,3 K dan dari kurva *fitting* diperoleh  $J_{c0}$  pada suhu 5 K dan 77 K berturut-turut adalah  $4,0 \times 10^4 \text{ A.cm}^{-2}$  dan  $3,3 \times 10^4 \text{ A.cm}^{-2}$ . Konstanta  $a$  pada suhu 5 K dan 77 K berturut-turut adalah 3,5 dan 1. Rapat gaya *pinning* maksimum ( $Fp_{maks}$ ) cuplikan pada suhu 5 K dan 77 K berturut-turut adalah  $4,2 \times 10^8 \text{ N.m}^{-3}$  dan  $2,1 \times 10^8 \text{ N.m}^{-3}$ . Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa  $J_c$  bahan berkurang seiring dengan meningkatnya medan magnet luar  $H$ . Karakteristik penyusutan  $J_c$  terhadap medan magnet ini secara umum bersesuaian dengan fenomena *flux creep* berdasarkan model *J. Horvat* dan kawan-kawan. Faktor-faktor terpenting dalam memahami karakteristik penyusutan  $J_c$  ini adalah antara lain adanya energi bebas *Gibbs*, rapat gaya *Lorentz*, *flux creep* dalam *vortex*, arus *vortex* dan suhu yang diterapkan.

**Kata kunci:** Superkonduktor, rapat arus kritis, medan magnet

### ABSTRACT

**THE CRITICAL CURRENT DENSITY DECREASE CHARACTERISTIC OF  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  IN MAGNETIC FIELD ENVIRONMENT.** The critical current density ( $J_c$ ) decrease characteristic of the superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  by melting process has been studied. The  $J_c$  calculation is done with measure magnetic moment of the sample by using of the superconducting quantum interference device (SQUID) in the external magnetic field ( $H$ ) from 0 until 20 kOe at 5 K and 77 K. The critical temperature ( $T_c$ ) of the sample is 90.6 K and the  $J_c$  at 5 K and 77 K of the fitting curves are  $4.0 \times 10^4 \text{ A.cm}^{-2}$  and  $3.3 \times 10^4 \text{ A.cm}^{-2}$ , respectively. And the variable constant  $a$  of the fitting curves are 3.5 and 1, respectively. The maximum pinning force ( $Fp_{max}$ ) of the sample at 5 K and 77 K are  $4.2 \times 10^8 \text{ N.m}^{-3}$  and  $2.1 \times 10^8 \text{ N.m}^{-3}$ , respectively. From this experiment, we concluded that the  $J_c$  substance decrease along with the increasing of external magnetic field  $H$ . The characteristic of decrease  $J_c$  on this magnetic field in general chime in with the phenomenon of flux creep to model *J. Horvat et.al*. The important factors in comprehending this  $J_c$  decrease characteristic are for example the existence of free energy *Gibbs*, the *Lorentz* force, flux creep in the *vortex*, the *vortex* current, and temperature applied.

**Key words :** Superconductor, critical current density, magnetic field

### PENDAHULUAN

Penelitian dan pengembangan superkonduktor keramik bersuhu transisi kritis tinggi (STT), khususnya sistem  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) [1], Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO) [2], dan Ti-Ba-Ca-Cu-O (TBCCO) [3], masih terus dilakukan orang, terutama diarahkan pada aplikasi praktis. Untuk kebanyakan aplikasi disyaratkan bahwa superkonduktor oksida tersebut harus memiliki rapat arus kritis ( $J_c$ ) dalam orde  $10^4 \text{ A.cm}^{-2}$  hingga  $10^6 \text{ A.cm}^{-2}$ . Harga rapat arus sebesar itu seringkali harus dipenuhi di dalam lingkungan medan magnet yang besar. Padahal dalam lingkungan bermedan magnet, rapat arus kritis bahan tersebut menyusut. Namun demikian, karena rapat arus kritis

ternyata bukan sifat intrinsik superkonduktor, maka  $J_c$  bisa diupayakan agar masih tetap relatif tinggi harganya walaupun di dalam lingkungan bermedan magnet yang besar. Hal itu dilakukan dengan mengontrol strukturmikro bahan tersebut.

Dalam kenyataan pengontrolan strukturmikro sangat sulit dilakukan, namun hasil pengembangan terbaru menunjukkan bahwa  $J_c$  tinggi bisa diperoleh dalam superkonduktor oksida tersebut [4-6]. Rendahnya  $J_c$  adalah karena lemahnya *link* antara batas-batas butir kristal dan tidak adanya pusat-pusat jepitan *vortex* [7]. Oleh karena itu, pengontrolan strukturmikro bahan dilakukan agar butiran-butiran kristal superkonduktor

yang terbentuk mengarah ke suatu arah tertentu (bertekstur) dan sekaligus tercipta pusat-pusat jepitan yang berfungsi sebagai penghambat terhadap pergerakan vorteks. Para peneliti telah menemukan cara pengontrolan strukturmikro yang efektif, yakni melalui proses pelelehan, antara lain dengan metode *Melt Texture Growth* (MTG), *Quench Melt Growth* (QMG) dan *Powder Melt Processes* (PMP) [8,9].

Penelitian tentang pengaruh medan magnet  $H$  pada arus kritis  $I_c$  telah dilakukan oleh *J. Horvat* dan kawan-kawan [10] pada pita komposit superkonduktor Ag/BSCCO. Secara empirik mereka mendapatkan hubungan antara  $I_c$  terhadap  $H$  dalam daerah *flux creep*, yakni :

$$I_c = I_{c0} \exp[-(H/H_0)^{a+1}],$$

dimana  $I_{c0}$  adalah arus kritis bahan dalam lingkungan tanpa medan magnet,

$$H_0 = [b(a+1)]^{1/(a+1)},$$

$a$  dan  $b$  adalah konstanta. Sedangkan *Liu* dan kawan-kawan [11] menunjukkan bahwa penyusutan  $J_c$  terhadap  $H$  pada pita komposit superkonduktor Ag/BSCCO pada 77 K terkait dengan fraksi fasa-2212 di dalam matriks fasa-2223 dan terbukti bahwa fasa-2212 berperan sebagai pusat jepitan terhadap pergerakan vorteks. Sedangkan *S. Jin* dan kawan-kawan [12] mengungkapkan bahwa  $J_c$  pada YBCO hasil proses pelelehan menyusut dari 7.400 A.cm<sup>-2</sup> pada  $H = 0$  T, menjadi 1.000 A.cm<sup>-2</sup> pada  $H = 1$  T. Sedangkan pada YBCO produk *sinter*,  $J_c$  menyusut dari 150-600 A/cm<sup>2</sup> pada  $H = 0$  T menjadi 0,5-2 A.cm<sup>-2</sup> pada  $H = 1$  T. Namun demikian karakteristik penyusutan  $J_c$  pada YBCO belum diungkapkan secara lengkap.

Penyusutan rapat arus kritis di dalam lingkungan medan magnet adalah suatu fenomena fisis yang tidak bisa dihindarkan. Namun demikian fenomena fisis tersebut tidak menjadi penghalang untuk memanfaatkan bahan ini dalam aplikasi praktis, asalkan karakteristik penyusutan rapat arus kritis tersebut diketahui.

Tujuan penelitian ini adalah menentukan karakteristik penyusutan rapat arus kritis *bulk* superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  hasil proses pelelehan dengan metode *MTG* di dalam lingkungan medan magnet. Pengukuran rapat arus kritis dilakukan menggunakan *Superconducting Quantum Interference Device* (SQUID) pada suhu 5 K dan 77 K.

## METODE PERCOBAAN

Sampel superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  dibuat melalui reaksi padatan dengan mencampurkan oksida-oksida penyusun, yaitu :  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ , dan  $CuO$  dengan perbandingan stokiometri unsur  $Y : Ba : Cu = 1 : 2 : 3$ . Hasil pencampuran tersebut dikalsinasi pada suhu 900 °C selama 4 jam, setelah itu dicetak dalam bentuk

pelet (sampel silinder) dengan ukuran  $d$  (tebal) = 1,5 mm dan  $D$  (diameter) = 6 mm dan ditekan 2000 psi. Sampel yang telah dicetak selanjutnya *disinter* pada suhu 940 °C selama 10 jam di dalam aliran udara biasa [13]. Kemudian dilanjutkan dengan proses pelelehan dengan metode *Melt Texture Growth* Modifikasi (MTG). Langkah-langkah proses pelelehan tersebut adalah sebagai berikut: kedua sampel tadi dipanaskan pada suhu 1100 °C dengan laju 450 °C/jam dan ditahan selama 12 menit kemudian diturunkan secara cepat pada suhu 1000 °C. Selanjutnya suhu diturunkan kembali secara perlahan (*slow cooling*) sampai 900 °C dengan laju 20 °C/jam [14].

Pengujian efek *Meissner* dari sampel dilakukan dengan cara sebagai berikut : mula-mula sampel direndam ke dalam nitrogen cair selama 10 menit. Hal ini dilakukan agar suhu di dalam sampel diharapkan homogen pada suhu nitrogen cair sebesar  $T = 77$  K. Kemudian magnet permanen diletakkan di atas permukaan sampel tersebut. Apabila sampel melayang di atas permukaan magnet tersebut, berarti bahan tersebut diindikasikan sebagai bahan superkonduktor dan begitu sebaliknya. Kemudian diukur sifat magnetnya dengan menggunakan magnetometer SQUID. Pengukuran ini dilakukan di *Institute for Material Research* Universitas Tohoku, Sendai, Jepang. Alat ini bekerja berdasarkan metode induksi. Sampel diukur pada suhu  $T = 5$  K dan  $T = 77$  K dalam rentang medan magnet luar  $H$  dari 0 kOe sampai dengan 20 kOe. Harga  $J_c$  dapat ditentukan berdasarkan hasil pengukuran data magnetisasi dengan menggunakan formula *Bean model* :

$$J_c = \frac{2\Delta M}{d}$$

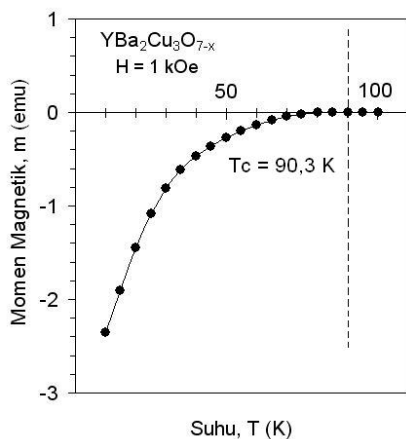
dimana  $\Delta M$  dan  $d$  berturut-turut adalah magnetisasi dan ketebalan sampel. [15,16].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat superkonduktivitas bahan dapat diketahui dengan melakukan pengujian efek *Meissner* dan pengukuran suhu transisi kritis ( $T_c$ ). Hasil pengujian efek *Meissner* menunjukkan bahwa magnet tersebut melayang di atas permukaan sampel. Hal ini menunjukkan bahwa *flux* medan magnet yang diterapkan tidak dapat menembus ke dalam sampel (*total flux extrusion*). Pada kondisi ini sampel bersifat diamagnetik sempurna yang merupakan indikasi awal bahwa sampel ini merupakan bahan superkonduktor. Namun penolakan *flux* secara total ini hanya terjadi pada suhu  $T < T_c$ . Suhu transisi kritis ( $T_c$ ) sampel ini adalah 90,3 K seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Pada Gambar 1 juga diperlihatkan bahwa momen magnetik tampak semakin berkurang dengan meningkatnya suhu. Menurut *Rose-Innes* dan *Rhoderick* [17] apabila pada bahan tersebut diterapkan medan magnet sebesar  $H$  maka hal ini juga berarti

pemberian energi *Gibbs* kepada bahan tersebut. Sedangkan besarnya energi kinetik pasangan elektron yang sering disebut dengan *pair interaction energy*, yaitu energi yang diperlukan untuk pembentukan pasangan elektron (pada superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  disebut dengan *cooper pair*) sangat bergantung pada suhu [18]. 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 *Gibbs* ini akan melebihi besarnya *pair interaction energy*, sehingga energi eksternal ini yang membawa bahan tersebut keluar dari keadaan superkonduksi. Dengan kata lain energi ini sama dengan energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron yang berpasangan (*depairing*) menjadi elektron normal.

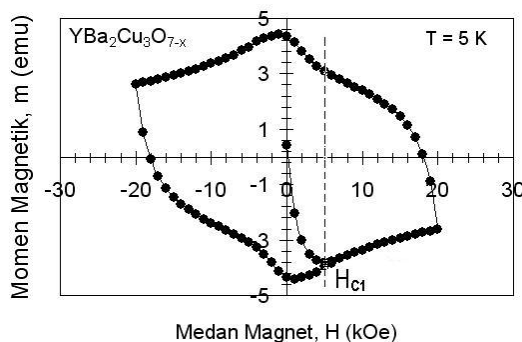


Gambar 1. Kurva  $m - T$  yang diukur pada medan magnet 1 kOe

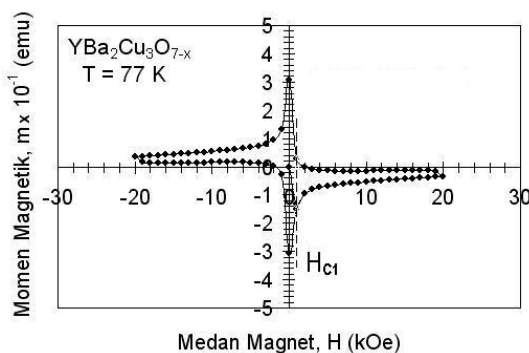
Pada Gambar 2 (a) dan Gambar 2 (b) adalah kurva magnetisasi  $m$  terhadap  $H$  dalam bentuk *loop* histerisis sampel yang diukur pada suhu 5 K dan 77 K. Kedua kurva histerisis tersebut menunjukkan deskripsi mekanisme proses magnetisasi dan demagnetisasi. Skenario untuk proses magnetisasi dan demagnetisasi akibat imbasan medan magnet luar dalam setiap keadaan kritis telah diungkapkan pada penelitian sebelumnya [19].

Pada Gambar 2 dapat dijelaskan bahwa momen magnetik bahan akan bertambah secara linier dalam arah negatif ( $m < 0$ ) seiring dengan membesarnya medan magnet luar. Arah negatif ini menunjukkan bahwa arah momen magnetiknya berlawanan dengan arah medan magnet yang diterapkan. Hal ini sekaligus menunjukkan bahwa pada kondisi ini sampai pada batas medan magnet dengan momen magnet tertinggi bahan tersebut bersifat diamagnetik (*Meissner state*). Batas medan magnet dengan momen magnet tertinggi ini disebut medan magnet kritis ( $H_{c1}$ ). Kemudian momen magnetik bahan terus berkurang.

Pada Gambar 2 di atas terlihat pula adanya perbedaan medan magnet kritis  $H_{c1}$  yang diukur pada



(a) Diukur pada suhu  $T = 5 \text{ K}$



(a) Diukur pada suhu  $T = 77 \text{ K}$

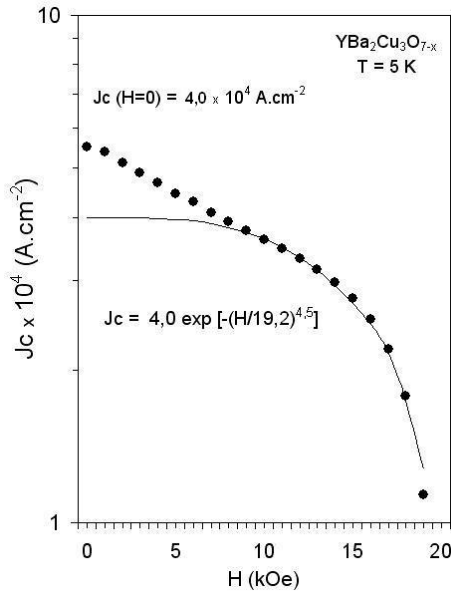
Gambar 2. Kurva  $m-H$

suhu 5 K dan 77 K, yaitu berturut-turut adalah 5 kOe dan 1 kOe. Semakin rendah suhu pengukuran, nilai  $H_{c1}$  semakin besar. Menurut hasil penelitian yang diperoleh *Pippard* bahwa apabila suhu  $T$  jauh di bawah  $T_c$  maka kerapatan elektron yang berpasangan (*paired electrons*)  $n_s$  semakin banyak dan kerapatan elektron tunggal (*unpaired electrons*)  $n_n$  semakin sedikit sehingga mengakibatkan *pair interaction energy* semakin kuat. Dan apabila suhu  $T$  mendekati harga  $T_c$  maka  $n_s$  semakin sedikit dan  $n_n$  semakin banyak sehingga *pair interaction energy* ini semakin lemah. Besar kecilnya jumlah kerapatan elektron berpasangan ini bergantung dengan faktor suhu [20].

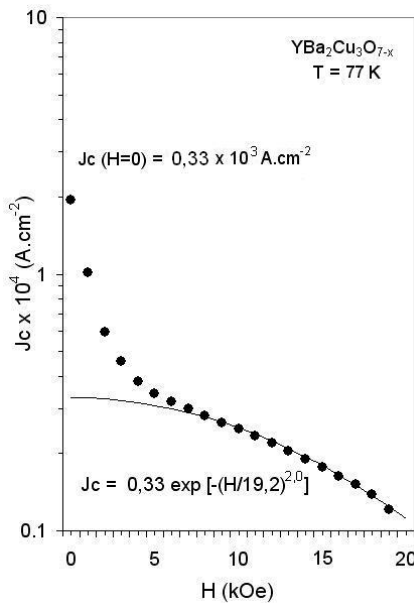
Pada Gambar 3 merupakan kurva ketergantungan rapat arus kritis ( $J_c$ ) terhadap medan magnet luar ( $H$ ) yang dihitung dari kurva Gambar 5 pada setiap keadaan medan magnet terpasang ( $H$ ) yang diukur pada suhu  $T = 5 \text{ K}$  dan  $77 \text{ K}$ . Tampak bahwa  $J_c$  menurun seiring dengan meningkatnya medan magnet luar ( $H$ ).

Fenomena ini menunjukkan bahwa ada tiga daerah karakteristik penyusutan  $J_c$  akibat adanya medan magnet luar. Tiga daerah medan magnet ini sangat bersesuaian dengan rumusan dari *Ginzburg Landau*, yaitu : daerah medan magnet di bawah  $H_{c1}$  (*Meissner state*), daerah medan magnet  $H_{c1} < H < H_{c2}$  (*mixed state*), dan daerah medan magnet  $H_{c2} < H < H_{c3}$  (*surface superconductivity*) [18].

Apabila pada sebuah bahan superkonduktor diterapkan medan magnet induksi  $B$  berubah terhadap



(a) Pada suhu  $T = 5$  K



(b) Pada suhu  $T = 77$  K

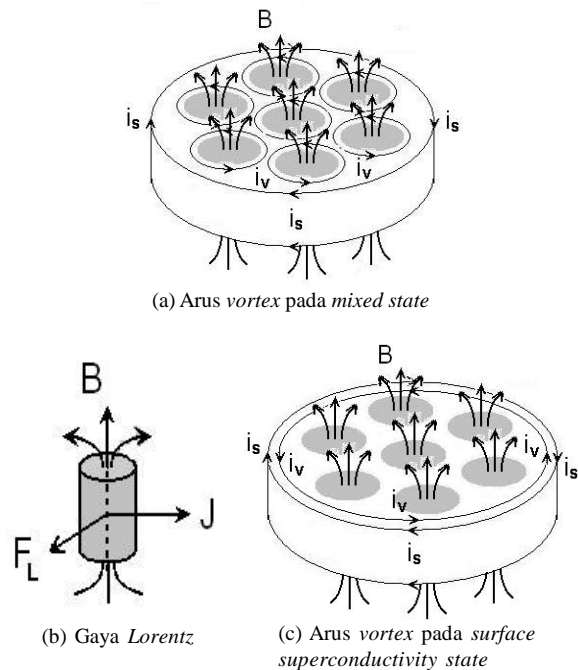
Gambar 3. Kurva  $J_c - H$

waktu pada suhu dibawah  $T_c$  maka menurut hukum Maxwell akan timbul medan listrik disekitar permukaan bahan. Adanya medan listrik ini berarti disekitar permukaan ada muatan listrik. Dan apabila muatan listrik ini berubah terhadap waktu maka akan timbul arus listrik di permukaan  $i_s$ . Sedangkan adanya  $B$  dan  $i_s$  ini akan menghadirkan gaya Lorentz. Karena arus listrik bergerak melingkar, maka arah gaya Lorentz mengikuti hukum gaya sentripetal yaitu menuju ke pusat. Sehingga arah arus listrik ini akan bergerak mengikuti kaidah hukum Lorentz seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4(a) [17, 21].

Menurut J. Horvat dan kawan-kawan, pada keadaan Meissner,  $J_c$  mampu dipertahankan sampai pada medan magnet  $H_{c1}$ . Hal ini disebabkan flux medan magnet

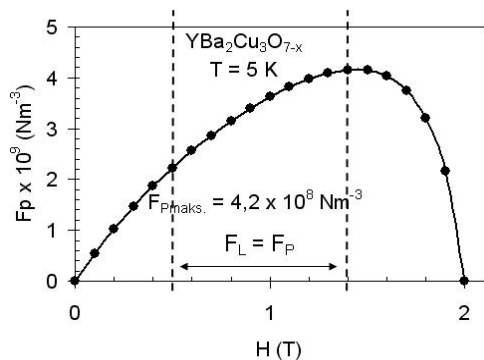
tidak ada yang menembus bahan (*total flux extrusion*). Penolakan flux total tersebut hanya terjadi di bawah medan magnet  $H_{c1}$ .

Penambahan medan magnet  $H$  selanjutnya di atas  $H_{c1}$ , superkonduktor berada dalam keadaan tercampur (*mixed state*). Pada keadaan tercampur menurut Rose-Innes dan Rhoderick, sebagian flux medan magnet  $H$  sudah memasuki bahan dalam bentuk fluksoid. Kehadiran fluksoid ini mengakibatkan medan magnet induksi bahan  $B$  tidak bernilai nol namun bahan masih bersifat superkonduktif. Setiap fluksoid yang berhasil menerobos ke dalam bahan superkonduktor ini dalam keadaan tercampur (*mixed*), selalu dibendung oleh arus perisai ( $i_s$ ) (*screening current*) yang mengelilinginya tanpa disipasi. Sehingga terjadi lokalisasi fluksoid secara lateral yang kemudian lazim disebut dengan *vortex*. Namun adanya *vortex* ini pada bahan akan menghadirkan arus Eddy (*Eddy current*) disekitar *vortex* yang kemudian lazim disebut dengan arus *vortex* ( $i_v$ ) seperti ditunjukkan pada Gambar 4(a) [17, 21].

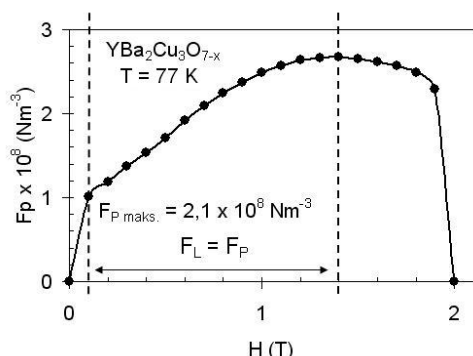


Gambar 4. Lokalisasi fluksoid pada sampel [17, 21]

Pada keadaan tercampur ini,  $J_c$  tampak menurun relatif lebih kecil dibandingkan dengan keadaan Meissner sampai pada medan magnet  $H_{c2}$ . Faktor-faktor yang mempengaruhi berkurangnya harga  $J_c$  pada keadaan ini adalah munculnya rapat gaya Lorentz ( $F_L$ ) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4(b) dalam sistem *vortex* yang bergantung pada rapat arus yang bersangkutan, *flux creep*, dan arus *vortex*. Akibat gaya Lorentz ini, *vortex* cenderung untuk bergerak dan *hopping*. Namun pada sampel ini pergerakan *vortex* dapat dicegah dengan adanya *potensial pinning*. Sumber-sumber *pinning* dapat berupa cacat kristal dan impuritas bahan. Cacat kristal meliputi cacat titik (*point defect*) yaitu: cacat



(a) Pada suhu  $T = 5$  K



(b) Pada suhu  $T = 77$  K

Gambar 5. Kurva  $F_p - H$

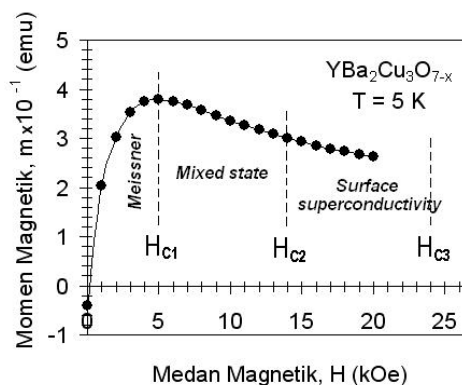
Schottky (vacancy), cacat Frankel (interstitial), pusat warna dan lain-lain, cacat garis (line defect) yaitu : dislokasi (screw, slip) dan bidang kembar (twin plane). Sedangkan impuritas pada bahan ini adalah  $Y_2BaCuO_5$  [22-24]. Besarnya rapat gaya pinning  $F_p$  pada suhu 5 K dan 77 K ditunjukkan pada Gambar 5.

Pada Gambar 5 tampak bahwa seiring dengan meningkatnya medan magnet luar  $H$ ,  $F_p$  meningkat pula sampai pada batas maksimumnya.  $F_p$  maksimum terletak pada medan magnet 14 kOe. Fenomena ini menunjukkan bahwa pada daerah medan ini,  $F_p$  masih mampu menahan gerakan vortex sehingga vortex tidak dapat bergerak secara bebas. Sehingga harga  $J_c$  masih dapat dipertahankan pada keadaan ini. Hal ini tampak pada Gambar 3 bahwa berkurangnya harga  $J_c$  relatif lebih kecil. Dengan kata lain  $J_c$  dapat dipertahankan sampai pada medan magnet  $H_{c2} = 14$  kOe. Berkurangnya  $J_c$  pada keadaan ini diduga berasal dari arus vortex.

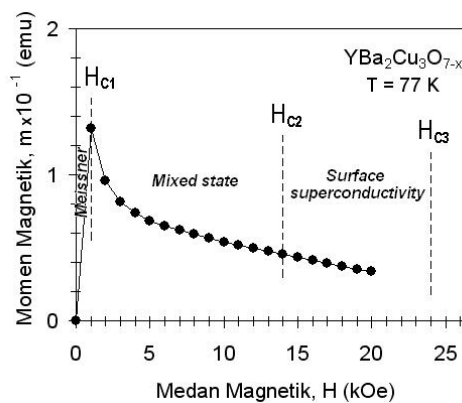
Kontribusi lain dari berkurangnya  $J_c$  ini adalah flux creep di dalam vortex. Dengan membesarnya medan magnet  $H$ , jumlah fluksoid yang terlokalisasi akan bertambah sehingga terjadi perambatan flux dalam vortex. Akibatnya arus vortex ( $i_v$ ) meningkat. Arus vortex ( $i_v$ ) muncul akibat adanya medan magnet induksi  $B$  pada bahan. Arah  $i_v$  ini berlawanan dengan arah arus screening  $i_s$ . Pada hakekatnya kontribusi terbesar berkurangnya  $J_c$  ini adalah meningkatnya arus vortex.

Penambahan medan magnet  $H$  selanjutnya di atas  $H_{c2}$ , superkonduktor berada dalam keadaan surface

superconductivity. Pada keadaan ini  $J_c$  tampak menurun relatif lebih tajam dibandingkan dengan keadaan tercampur sampai pada medan magnet  $H_{c3}$ . Hal ini disebabkan rapat gaya pinning mulai melemah seiring dengan membesarnya medan magnet  $H$ . Dengan demikian vortex mulai bebas bergerak. Pergerakan vortex ini akan menimbulkan medan listrik yang searah dengan rapat arus berdasarkan Hukum Maxwell. Sehingga kehadiran medan listrik inilah yang mengakibatkan transpor listrik yang bersifat disipatif. Disamping itu, akibat pergerakan vortex dan flux creep ini menyebabkan arus vortex terakumulasi di permukaan bahan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4(c) sehingga  $J_c$  tampak semakin kecil. Oleh sebab itu keadaan ini disebut dengan surface superconductivity, yaitu suatu keadaan dimana sifat superkonduktivitas tinggal di permukaan bahan.



(a) Pada suhu  $T = 5$  K



(b) Pada suhu  $T = 77$  K

Gambar 6. Medan magnet kritis

Keadaan ini berakhir sampai pada batas medan magnet  $H_{c3}$ . Selanjutnya sifat superkonduktivitas bahan akan hilang (total penetration). Menurut Van Duzer [25], harga  $H_{c3}$  ini dapat didekati dengan persamaan :

$$H_{c3} \approx 1,69H_{c2}$$

Sehingga medan magnet  $H_{c3}$  dapat diperoleh sebesar 24 kOe. Dengan demikian batas-batas medan magnet kritis pada setiap keadaan dapat dirangkum seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Pada Gambar 3 diperoleh persamaan *fitting* kurva  $J_c - H$  sebagai berikut:

$$J_c = 4,0 \exp[-(H/19,2)^{4,5}] \text{ dan}$$

$$J_c = 0,33 \exp[-(H/19,2)^2]$$

yang berturut turut untuk kurva yang diukur pada  $T = 5 \text{ K}$  dan  $T = 77 \text{ K}$ . Dari persamaan tersebut diperoleh  $J_{c0} (T = 5 \text{ K}) = 4,0 \times 10^4 \text{ A.cm}^{-2}$  dan  $J_{c0} (T = 77 \text{ K}) = 3,3 \times 10^3 \text{ A.cm}^{-2}$ . Sedangkan besarnya konstanta  $a (T = 5 \text{ K}) = 3,5$  dan  $a (T = 77 \text{ K}) = 1$ . Menurut model *J. Horvat* bahwa semakin besar harga konstanta  $a$  berarti perambatan *flux* medan magnet di bahan semakin kecil. Dengan kata lain bahwa pada kondisi itu bahan memiliki gaya *pinning* yang sangat besar sehingga *vortex* sulit untuk bergerak dan  $J_c$  mampu dipertahankan sampai pada batas gaya *pinning* maksimum. Hal ini secara umum bersesuaian dengan fenomena perambatan *flux* (*flux creep*) berdasarkan kerangka kerja model oleh *J. Horvat* dan kawan-kawan yang dapat memberikan gambaran lengkap mengenai ketergantungan  $J_c$  terhadap medan magnet [10].

## KESIMPULAN

Penghitungan rapat arus kritis ( $J_c$ ) dalam rentang dari medan magnet luar ( $H$ ) dalam rentang 0 kOe sampai dengan 20 kOe yang diukur pada suhu 5 K dan 77 K pada sampel superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  hasil proses pelelehan telah dilakukan.  $J_c$  bahan akan berkurang seiring dengan meningkatnya medan magnet luar  $H$ . *Fitting* kurva  $J_c - H$  diperoleh persamaan empiris sebagai berikut:

$$J_c = 4,0 \exp[-(H/19,2)^{4,5}] \text{ dan}$$

$$J_c = 0,33 \exp[-(H/19,2)^2]$$

yang berturut turut untuk kurva yang diukur pada  $T = 5 \text{ K}$  dan  $T = 77 \text{ K}$ . Dari persamaan tersebut diperoleh  $J_{c0} (T = 5 \text{ K}) = 4,0 \times 10^4 \text{ A.cm}^{-2}$  dan  $J_{c0} (T = 77 \text{ K}) = 3,3 \times 10^3 \text{ A.cm}^{-2}$ . Sedangkan besarnya konstanta  $a (T = 5 \text{ K}) = 3,5$  dan  $a (T = 77 \text{ K}) = 1$ . Karakteristik penyusutan  $J_c$  terhadap medan magnet ini secara umum bersesuaian dengan fenomena *flux creep* berdasarkan model *J. Horvat* dan kawan-kawan yang mengikuti hubungan

$$I_c = I_{c0} \exp[-(H/H_0)^{a+1}]$$

Faktor-faktor terpenting dalam memahami karakteristik penyusutan  $J_c$  ini adalah adanya energi bebas *Gibbs* yaitu energi dalam yang muncul akibat adanya medan magnet  $H$  yang diterapkan terhadap suatu bahan, munculnya gaya *Lorentz* yang mengakibatkan pergerakan *vortex*, *flux creep* dalam *vortex* sehingga mengakibatkan arus *vortex* meningkat, dan suhu yang diterapkan mendekati suhu transisi kritis bahan ini.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Bapak Drs Gunandjar, S.U. selaku Kepala Puslitbang Iptek Bahan BATAN, DR. Ridwan selaku Kepala Bidang Bahan Maju P3IB – BATAN yang telah memberikan kesempatan untuk penelitian, dan DR. Setyo Purwanto, dan kepada semua pihak yang telah membantu dalam kelancaran penulisan makalah ini.

## DAFTARACUAN

- [1.] MURAKAMI, M., *Supercond. Sci. Technol.*, **5** (1992) 185-203
- [2.] SUN, Y., ZHANG, F., LU, Z., JIANG, J., DU, J., ZHANG, Y., *Phys. Rev. B*, **51** (1) (1995). TINKAM, M., *Helv. Phys. Acta* **61** (1988) 443
- [3.] CHOI, C.H., ZHAO, Y., SORREL, C.C., LAROBINA, M., ANDRIKIDIS, C., *Physica C*, **269** (1996) 306-312
- [4.] JIN, S., TIEFEL, T.H., NAKAHARA, S., GRAEBNER, J.E., O'BRYAN, H.M., FASTNACHT, R.A., KAMMLOTT, G.W., *Appl. Phys. Lett.* **56** (13) (1990).
- [5.] KRABBES, G., SCHATZLE, P., BIEGER, W., WIESNER, U., STOVER, G., WU, M., STRASSER, T., KOHLER, A., LITZKENDORF, D., FISCHER, K., GORNET, P., *Physica C*, **244** (1995) 145-152
- [6.] MINGHU, F., GANGJIN, H., MENG, C., ZHENKUAN, J., QIRUI, Z., *Solid State Communications*, **89** (2) (1994) 93-95
- [7.] TIXADOR, P., OBRADORS, X., TOURNIER, R., PUIG, T., BOURGAULT, D., GRANADORS, X., DUVAL, J.M., MENDOZA, E., VARESI, E., BEAUGNON E., ISFORT, D., *Supercond. Sci. Technol.* **13** (2000) 493-497
- [8.] MURAKAMI, M., MORITA, M., DOI, K., MIYAMOTO, K., *Japanese Journal of Applied Physics*, **28** (7) (1989) 1189-1194
- [9.] HORVAT, J., DOU, S.X., LIU, H.K., BHASALE, R., *Physica C*, **271** (1996) 51-58
- [10.] LIU, H.K., GUO, Y.C., DOU, S.X., *Supercond. Sci. Technol.* **5** (1992) 591-598
- [11.] JIN, S., TIEFEL, H., SHERWOOD, R.C., VAN DOVER, R.B., DAVIS, M.E., KAMMLOTT, G.W., FASTNACHT, R.A., *Physical Review B*, **37** (13) (1988) 7850-7853
- [12.] SUKIRMAN, E., Pengaruh Distribusi Kekosongan Oksigen pada Superkonduktivitas  $YBa_2Cu_3O_7$ , *Thesis Master*, Fakultas Pasca Sarjana Universitas Indonesia (1991)
- [13.] WISNU ARIADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. W., dan GRACE TJ. SULUNGBUDI, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **3** (1) (2001) 38-44
- [14.] BEAN, C.P., *Phys. Rev. Lett.*, **8** (1962) 250
- [15.] MURAKAMI, M., *Supercond. Sci. Technol.*, **5** (1992) 185-203

- [16.] ROSE-INNES, A.C., RHODERICK, E.H.,  
*Introduction to Superconductivity*, Pergamon  
Press, (1969) 117-139
- [17.] BUCKEL, W., *Superconductivity*, VCH Publisher  
Inc., New York, (1991)
- [18.] WISNUARIADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S.  
WINATAPURA, dan S. PURWANTO, *Jurnal  
Sains Materi Indonesia*, **5** (1), (2003) 30-39
- [19.] PIPPARD, A.B., *IEEE Trans. Magn.*, **23** (2)  
(1987) 371-375
- [20.] ROGER WORDENWEBER, *Rep. Prog. Phys.*, **62**  
(1999) 187-236
- [21.] SHAN, L., SUN, A.M., XU, X.N., TANG, Y.L.,  
LU, D.W., JIN, X., SHE, L.J., LAM, C.C., CHEN,  
Y.S., *Supercond Sci. Technol*, **12** (1999) 1138-1142

## TANYA JAWAB

Darminto, Jurusan Fisika - ITS

### Pertanyaan

1. Disarankan untuk menggunakan *MTG* dengan  
*off-stoichiometric* untuk menciptakan fasa Y-211 yang  
berfungsi untuk *pinning centers*.
2. Disarankan untuk menggunakan *coated conductor*.

### Jawaban

1. Salah satu cara untuk menciptakan fasa Y-211 di  
dalam matriks Y-123 adalah dengan menambahkan  
secara langsung /inklusi fasa Y-211 atau dengan cara  
*off-stoichiometric*. Penumbuhan fasa Y-211 dapat  
digunakan sebagai pusat-pusat jepitan (*pinning  
centers*) agar *vortex* tidak dapat bergerak secara  
bebas.
2. *Coated conductor* adalah sebuah teknik pembuatan  
*thick film* untuk bahan superkonduktor, dalam hal ini  
adalah sistem Y-Ba-Cu-O. Kendala yang mungkin  
terjadi adalah peningkatan oksigen pada saat  
membuat *thick film* tersebut. Hal ini sudah pernah  
dicoba pada penelitian Riset Unggulan Terpadu  
(RUT) dengan Peneliti Utama Dra. Grace  
Tj. Sulungbudi, M.Sc.