

## ESTIMASI MEDAN KRITIS-ATAS SUPERKONDUKTIVITAS DARI KRISTAL TUNGGAL $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ DENGAN KADAR OKSIGEN BERBEDA

Adi Purwandana dan Darminto

Jurusan Fisika, FMIPA - ITS  
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

### ABSTRAK

**ESTIMASI MEDAN KRITIS-ATAS SUPERKONDUKTIVITAS DARI KRISTAL TUNGGAL  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  DENGAN KADAR OKSIGEN BERBEDA.** Dilaporkan dalam makalah kajian batas medan kritis-atas superkonduktivitas  $B_{c2}$  pada sampel kristal tunggal  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  yang dipersiapkan dengan metoda *travelling solvent floating zone*. Penentuan nilai medan kritis dilakukan berdasarkan data magneto-resistivitas pada bidang-ab kristal,  $\rho_{ab}(T,H)$ , dari kristal-kristal dengan kadar oksigen rendah, optimal dan tinggi dengan suhu kritis berurutan  $T_c = 80,6$  K, 93 K dan 76 K. Hasilnya menunjukkan bahwa sampel-sampel yang berturut-turut memiliki medan kritis-atas pada suhu mutlak 0 K :  $B_{c2}(0) = 4,01$  T, 49,52 T dan 55,10 T. Hasil ini menyiratkan bahwa bertambahnya kadar oksigen dalam kristal menimbulkan peningkatan kekuatan *pinning* dan penurunan derajat anisotropi, yang berdampak lebih jauh pada peningkatan nilai medan kritis-atas tersebut.

**Kata kunci :** Medan kritis, kristal tunggal, superkonduktivitas, dopan oksigen

### ABSTRACT

**ESTIMATION OF SUPERCONDUCTING UPPER CRITICAL FIELD OF  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  SINGLE CRYSTALS WITH DIFFERENT OXYGEN CONTENTS.** Presented in this paper is the study on superconducting upper critical field  $B_{c2}$  of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  single crystals grown by means of the travelling solvent floating zone method. Determination of critical field values has been conducted according to magneto-resistivity data measured across the *ab*-planes,  $\rho_{ab}(T,H)$ , of samples which are under-, optimally- and over-doped with oxygen with the respective  $T_c$  of 80.6 K, 93 K and 76 K. This resulted in the upper critical field at 0 K,  $B_{c2}(0)$ , for the corresponding samples of 4.01 T, 49.52 T and 55.10 T. It also implies that the increasing oxygen content leads to the enhancement of pinning strength and/or lowering degree of anisotropy, which induces further the increasing upper critical fields.

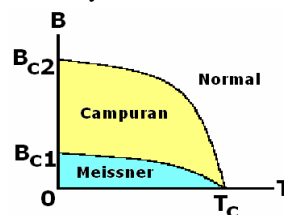
**Key words :** Critical field, single crystal, superconductivity, oxygen doped

### PENDAHULUAN

Bahan superkonduktif sejak ditemukan oleh Heike Kamerlingh Onnes pada tahun 1911 di Belanda, telah banyak mengalami perkembangan. Salah satu pokok perkembangan yang cukup menakjubkan adalah ditemukannya bahan superkonduktor suhu tinggi (SKST)-keramik oksida. Dua jenis material yang cukup mendapat perhatian dalam kategori ini adalah  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (Y-123) dan  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi-2212), berturut-turut dengan suhu kritis ( $T_c$ )  $\sim 92$  K dan  $\sim 85$  K [1].

Kedua material ini termasuk bahan superkonduktor tipe II, di mana pada rentang harga medan  $0 < B < B_{c1}$ , bahan superkonduktor bersifat diamagnetik sempurna (menolak medan magnet) yang dikenal sebagai efek *Meissner*, sedangkan pada rentang harga medan  $B_{c1} < B < B_{c2}$ , medan magnetik luar akan menembus bahan superkonduktor secara terkuantisasi membentuk benang-benang *vortex* (keadaan campuran,

*mixed state*). Dalam daerah ini masih dijumpai gejala superkonduktivitas pada bahan, meskipun terdapat gejala disipatif akibat terbentuknya *vortex*. Batas medan  $B_{c1}$  dan  $B_{c2}$  tersebut masing-masing disebut medan kritis bawah dan medan kritis atas. Dengan sifat ini, medan kritis atas khususnya menjadi sangat penting bagi aplikasi bahan SKST, yang menentukan kemampuan bahan menahan medan magnet dalam mempertahankan sifat superkonduktivitasnya, lihat Gambar 1.



**Gambar 1.** Diagram fasa medan (B) - suhu (T) dari bahan superkonduktor jenis II [1].

Salah satu topik bidang penelitian bahan SKST yang banyak dilakukan dalam lebih dari satu dekade terakhir antara lain pengkajian batas medan kritis atas,  $B_{c2}$ , terutama untuk kedua jenis material tersebut di atas. Pengukuran langsung  $B_{c2}$  tidak memungkinkan karena nilainya dapat mencapai puluhan hingga ratusan tesla pada suhu mutlak 0 K [2], sehingga metode penentuannya melalui cara lain sangatlah berguna.

Penelitian ini bertujuan untuk studi batas medan kritis atas ( $B_{c2}$ ) dari sampel  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi-2212), serta pengaruh penambahan *doping* oksigen secara sistematis terhadap karakteristik  $B_{c2}$  bahan SKST keramik oksida tersebut berdasarkan pengukuran magneto-resistivitas pada bidang-*ab* kristal,  $\rho_{ab}(T,H)$ , yang selama ini belum banyak dilakukan.

## METODE PERCOBAAN

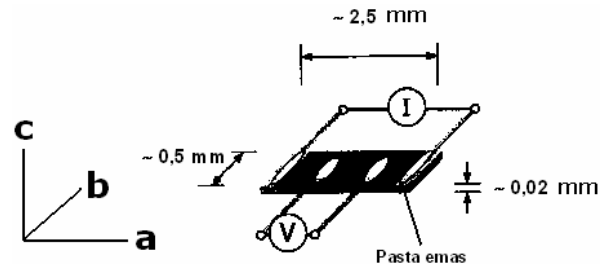
Sampel bahan superkonduktor Bi-2212 kristal tunggal berkualitas tinggi disiapkan melalui teknik *Travelling Solvent Floating Zone* (TSZF) dengan menggunakan tungku cermin (*mirror-furnace*)[3]. Sampel yang dikaji dalam penelitian ini berbasis pada perbedaan kandungan oksigen yang dimilikinya. Tiga sampel utama tersebut diberi notasi : Bi-UN (sampel Bi-2212 dengan tingkat *doping* oksigen rendah), Bi-OP (sampel Bi-2212 dengan tingkat *doping* oksigen optimal), dan Bi-OV (sampel Bi-2212 dengan tingkat *doping* oksigen tinggi). Untuk mengatur kandungan oksigen dalam kristal dilakukan melalui *penganilan* akhir (*post annealing*) setelah kristal ditumbuhkan dan disayat (*cleaved*) [3] di dalam tabung kuarsa dengan atmosfer oksigen yang diatur tekanannya. Variasi tekanan oksigen, suhu, dan lama *penganilan* diberikan dalam Tabel 1.

**Tabel 1.** Parameter *penganilan* untuk pengendalian kadar oksigen kristal [4].

Sampel	Tekanan oksigen (bar)	Suhu <i>penganilan</i> ( $^{\circ}\text{C}$ )	Lama <i>penganilan</i> (jam)
Bi-UN	$3,8 \times 10^{-4}$	600	60
Bi-OP	$4,6 \times 10^{-3}$	600	60
Bi-OV	2,1	400	60

Pengukuran resistivitas dilakukan pada bidang-*ab* (*in plane resistivity*,  $\rho_{ab}$ ) dengan menggunakan arus *dc* 10 mA dalam rentang suhu antara 15 K sampai dengan 300 K, dan dalam medan magnet luar yang bervariasi : 0 T; 0,01 T; 0,02 T; 0,05 T; 0,1 T; 0,2 T; 0,5 T; 1 T; dan 2 T, dengan arah sejajar sumbu *c* kristal. Untuk keperluan ini, kristal dipotong menurut ukuran yang sesuai dan dipersiapkan dengan elektroda menurut konfigurasi 4-*probe*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Kontak listrik dibuat dengan memakai pasta emas yang dipoleskan pada permukaan kristal, lalu

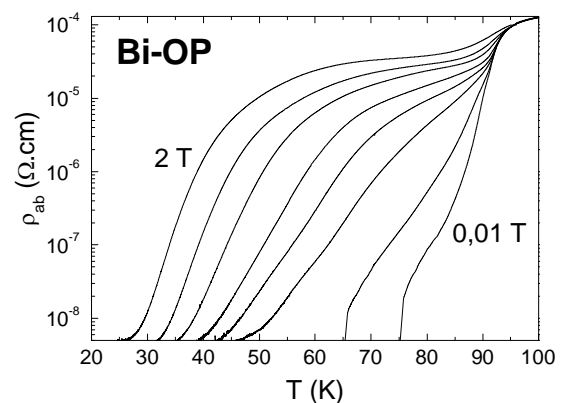
dipanaskan pada suhu  $800^{\circ}\text{C}$  selama 20 menit, kemudian didinginkan dengan cepat (*quenching*) pada permukaan keping tembaga (Cu). Pemasangan elektroda dengan cara tersebut telah menekan hambatan kontak tersebut hingga  $< 1$ . Pengukuran resistivitas ini menggunakan peralatan bertipe SVT INS EET-2610 buatan *Cryo Industries*.



**Gambar 2.** Konfigurasi elektroda 4-*probe* untuk pengukuran  $\rho_{ab}$ .

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Ditampilkan dalam Gambar 3 salah satu hasil pengukuran magneto-resistivitas  $\rho_{ab}(T,H)$  dari sampel Bi-OP dalam rentang suhu antara 20 K sampai dengan 100 K dan dengan medan magnet dari 0,01 T sampai dengan 2 T. Teramati bahwa suhu kritis  $T_c$  untuk sampel ini sekitar 93 K, sementara untuk kedua sampel lainnya, Bi-UN dan Bi-OV (gambar tak disertakan), berturut-turut 80,6 K dan 76 K. Secara umum, kurva  $\rho_{ab}(T,H)$  melebar dengan bertambahnya medan magnet yang diberikan. Bentuk kelengkungan kurva (*line shape*) berkaitan erat dengan mekanisme *pining* khususnya yang terjadi dalam daerah *vortex cair* (*liquid state*). Kajian ini telah dilaporkan sebelumnya [5]. Dalam makalah ini, bentuk kurva terutama di daerah kritis sekitar  $T_c$  dapat memprediksi nilai  $B_{c2}$  sebagaimana pada analisis di bawah ini.



**Gambar 3.** Kurva kebergantungan resistivitas terhadap suhu, dalam medan yang bervariasi dari 0,01 T sampai dengan 2 T dari salah satu sampel dengan *doping* oksigen optimal (Bi-OP).

Perkiraan nilai batas medan kritis atas pada suhu mutlak 0 K atau  $B_{c2}(0)$  dilakukan berdasarkan hubungan yang diberikan oleh Werthamer *et al* (1966) [6] sebagai berikut :

$$B_{c2}(0) = 0,7 T_c (\beta) T_c \dots\dots\dots (1)$$

di mana  $\beta$  menyatakan gradien batas medan kritis atas yang diekstraksi dari kemiringan garis singgung kurva-kurva  $B\rho_N(T)/\rho_{ab}(T)$  untuk setiap harga medan yang berbeda [7].  $\rho_N(T)$  adalah nilai resistivitas yang diekstrapolasi dari keadaan normal di atas  $T_c$ .

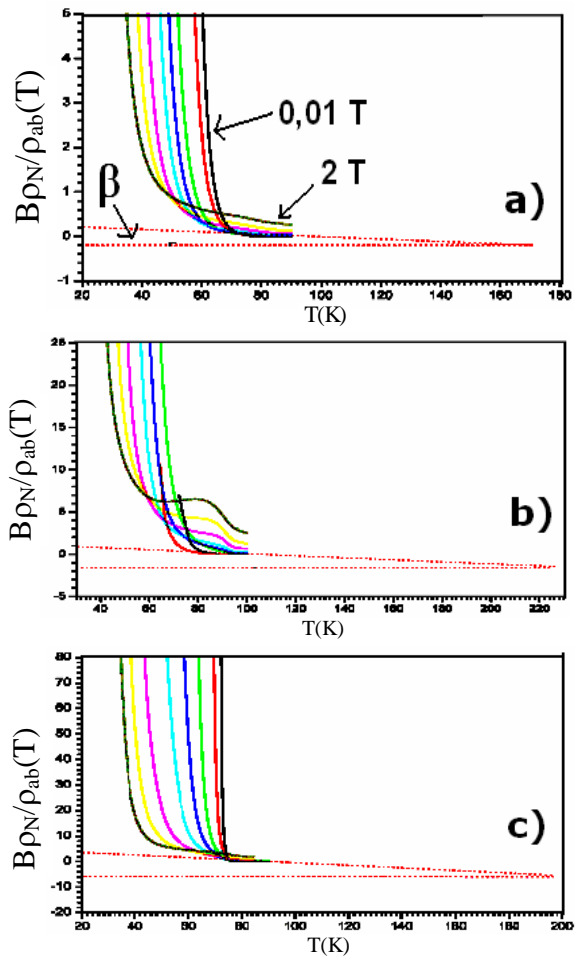
Gambar 4 memperlihatkan kurva untuk mengekstraksi gradien  $B_{c2}(\beta)$  untuk seluruh sampel yang digunakan dalam studi ini. Hasil estimasi selengkapnya diberikan pada Tabel 2. Terbaca pada Tabel 2 bahwa nilai kemiringan  $\beta$  dan medan kritis atas pada suhu mutlak  $B_{c2}(0)$  meningkat monoton dengan bertambahnya kadar oksigen dalam kristal. Hal ini juga ditunjang oleh penurunan nilai anisotropi [8] yang juga monoton pada sampel secara berturutan. Berdasarkan kajian yang telah dilakukan Cohen, *et al.* [6], nilai  $B_{c2}(0)$  pada sampel Bi-2212 ini jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan sampel dengan anisotropi rendah seperti Y-123, yang mencapai  $\sim 140$  T. Fakta ini dapat terjadi sebagai akibat dari derajat anisotropi yang cukup tinggi pada sistem Bi-2212.

**Tabel 2.** Gradien  $B_{c2}(\hat{a})$  dan  $B_{c2}(0)$  dari ketiga sampel Bi-2212 dengan kandungan oksigen berbeda.

Sampel	$T_{c,on}$ (K)	$\gamma^2$ [8]	$\beta(T/K)$	$B_{c2}(0)$ (tesla)
Bi-UN	80,6	49.715	0,07	4,01
Bi-OP	93	18.913	0,75	49,52
Bi-OV	76	7.067	1,00	55,10

Berdasarkan tinjauan konfigurasi sistem *vortex* yang dimilikinya, sampel Bi-2212 memiliki jarak antarbidang kuprat ( $CuO_2$ ) yang jauh lebih lebar ( $d = 1,54$  nm) jika dibandingkan dengan sampel Y-123 ( $d = 1,20$  nm) [9,10]. Akibatnya, konfigurasi sistem *vortex* yang dihasilkannya juga akan cenderung tidak stabil (*vortex* lebih mudah kehilangan koherensinya) karena proses *decoupling* atau melemahnya hingga putus interaksi *vortex* antar bidang kuprat. Secara kuantitatif, penjelasan ini telah dapat dibuktikan melalui karakterisasi konfigurasi sistem *vortex* menurut kebergantungan energi aktivasi mobilitas *vortex* ( $U_H$ ) pada terhadap medan  $B$  [11].

Adapun tentang peningkatan rentang  $B_{c2}(0)$  seiring dengan penambahan *doping* oksigen, hal ini disebabkan oleh penurunan nilai anisotropi yang cukup signifikan pada bahan atau bertambah kuatnya efek *pinning* oleh cacat akibat adanya atom oksigen. Dengan kata lain, keberadaan *doping* oksigen akan menghadirkan *pinning vortex* sehingga *vortex* memiliki energi aktivasi



**Gambar 4.** Kurva untuk penentuan kebergantungan  $B_{c2}(T)$  dari sampel : (a) Bi-UN, (b) Bi-OP, (c) Bi-OV. Kemiringan kurva dengan garis titik-titik merupakan kebergantungan  $B_{c2}(T)$  yang berlaku hanya di dekat  $T_c$ .

yang cukup tinggi untuk dapat bergerak, melawan fluktuasi suhu dan medan luar yang diberikan. Dari hasil ini pula dapat disebutkan bahwa cacat yang lebih efektif untuk peningkatan efek *pinning* dalam kristal adalah cacat akibat *dopan* oksigen (sampel Bi-OV), dibandingkan dengan cacat akibat kekosongan atau kekurangan oksigen (*oxygen vacancy*) pada sampel Bi-UN.

## KESIMPULAN

Cara alternatif untuk penentuan medan kritis atas ( $B_{c2}$ ) dapat dilakukan berdasarkan data magneto-resistivitas melalui ekstraksi gradien batas medan kritis atas  $\beta(T)$  di daerah suhu transisi superkonduktif, sebagaimana diuraikan dalam makalah ini. Penambahan kadar *dopan* oksigen dalam sampel akan memberikan peningkatan mekanisme *pinning* pada sistem *vortex*, yang berakibat lebih lanjut pada kestabilan *vortex* dalam rentang medan yang lebih tinggi dibanding pada sampel dengan *doping* oksigen yang lebih rendah. Dengan demikian, nilai medan

kritis atas yang terbesar dimiliki oleh sampel dengan kadar oksigen tertinggi.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada Prof. K. Kishio untuk penggunaan fasilitas eksperimen, Prof. J. Shimoyama dan Dr. T. Motohashi untuk diskusi dan saran-saran yang bermanfaat. Sebagian dari penelitian ini dibiayai oleh *The Matsumae International Foundation*, Tokyo, Jepang, dan *The Third World Academy of Science (TWAS)*, Trieste, Italia.

## DAFTARACUAN

- [1]. M. CYROT and D. PAVUNA, *Introduction to Superconductivity and High Tc Materials*, World Scientific, Singapore (1992)
- [2]. V. VINOKUR, et al, *Physica C* **295** (1998) 209
- [3]. DARMINTO, et al, *Proceedings ITB* **31** (1999) 121
- [4]. DARMINTO, et al., *Kontribusi Fisika Indonesia* **10** (1999) 98
- [5]. DARMINTO, et al., *Phys. Rev. B* **62** (2000) 6649
- [6]. L. F. COHEN, et al, *Rep. Prog. Phys.* **60** (1997) 1581
- [7]. S.N. GORDEEV, et al, *Phys. Rev. B* **60** (1999) 10477
- [8]. DARMINTO, et al, *Physica C* **378-381** (2002) 479
- [9]. B. LUNDQVIST et al, *Phys. Rev. B* **62** (2000) 3542
- [10]. G. BLATTER, et al, *Rev. Mod. Phys.* **66** (1994) 1125
- [11]. A. PURWANDANA, *Resistivitas pada Fase Vorteks Cair dari Kristal Tunggal Superkonduktor Bi-2212 dengan Tingkat Doping Oksigen Berbeda*, Tugas Akhir (S-1), Jurusan Fisika FMIPA ITS (2005)