

# FAKTOR KOREKSI DIMENSI SAMPEL PADA SIFAT LISTRIK SUPERKONDUKTOR $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ DENGAN MENGGUNAKAN METODE *FOUR POINT PROBE*

Wisnu Ari Adi, Engkir Sukirman, Didin S. Winatapura, Grace Tj. Sulungbudi  
Pusat Penelitian dan Pengembangan Iptek Bahan, BATAN

## ABSTRACT

**CORRECTION FACTOR OF SAMPLE DIMENSION ON ELECTRICAL PROPERTIES ON  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  SUPERCONDUCTOR BY USING FOUR-POINT PROBE METHOD.** Correction factor of resistivity ( $\rho$ ) and current density ( $J$ ) measurement result has been performed by using four point probe method. Samples prepared for this research are from superconductor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  system in the form of two bulks and two thick sheets with different dimensions. The mean resistivities for both bulk samples measured at 100 and 200 K are 5.73 m $\Omega$ .cm, 5.72 m $\Omega$ .cm, and 6.77 m $\Omega$ cm, 6.73 m $\Omega$ cm respectively with mean gradients  $\alpha$  are 1.07 m $\Omega$ cm.K<sup>-1</sup> and 1.01 m $\Omega$ cm.K<sup>-1</sup> respectively. The mean resistivities for both thick sheet samples measured at 100 and 200 K are 5.56 m $\Omega$ .cm, 5.41 m $\Omega$ .cm, and 6.66 m $\Omega$ .cm, 6.63 m $\Omega$ .cm respectively with mean gradients  $\alpha$  are 1.1 m $\Omega$ .cm.K<sup>-1</sup> and 1.22 m $\Omega$ .cm.K<sup>-1</sup> respectively. The mean current densities measured on both samples form are 45.41 A.cm<sup>-2</sup>, 45.38 A.cm<sup>-2</sup>, 45.26 A.cm<sup>-2</sup>, and 45.14 A.cm<sup>-2</sup>, respectively. So it can be concluded that sample dimension factor affected measurement result and correction.

Keywords: Sample dimension, correction factor, resistivity, current density, superconductor.

## ABSTRAK

**FAKTOR KOREKSI DIMENSI SAMPEL PADA SIFAT LISTRIK SUPERKONDUKTOR  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  DENGAN MENGGUNAKAN METODE *FOUR POINT PROBE*.** Telah dilakukan kajian teoritik dan penerapannya untuk menjelaskan tentang pengaruh dimensi sampel terhadap faktor koreksi hasil pengukuran resistivitas ( $\rho$ ) dan rapat arus ( $J$ ) dengan metode *four point probe*. Sampel yang disiapkan pada penelitian ini adalah superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , 2 buah dalam bentuk pellet *bulk* dan 2 buah *thick sheet* yang masing-masing mempunyai dimensi yang berbeda. Resistivitas rata-rata kedua sampel bentuk *bulk* yang diukur pada suhu 100 dan 200 K berturut-turut adalah 5,73 m $\Omega$ .cm; 5,72 m $\Omega$ .cm; dan 6,77 m $\Omega$ cm; 6,73 m $\Omega$ cm dengan gradien rata-rata  $\alpha$  berturut-turut adalah 1,07 m $\Omega$ cm.K<sup>-1</sup> dan 1,01 m $\Omega$ .cm.K<sup>-1</sup>. Sedangkan resistivitas rata-rata untuk kedua sampel bentuk *thick sheet* yang diukur pada suhu 100 dan 200 K berturut-turut adalah 5,56 m $\Omega$ .cm; 5,41 m $\Omega$ .cm; dan 6,66 m $\Omega$ .cm; 6,63 m $\Omega$ .cm dengan gradien rata-rata  $\alpha$  berturut-turut adalah 1,1 m $\Omega$ .cm.K<sup>-1</sup> dan 1,22 m $\Omega$ .cm.K<sup>-1</sup>. Rapat arus kritis yang dihasilkan dari kedua bentuk sampel tersebut berturut-turut adalah 45,41 A.cm<sup>-2</sup>; 45,38 A.cm<sup>-2</sup>; 45,26 A.cm<sup>-2</sup>; dan 45,14 A.cm<sup>-2</sup>. Sehingga dapat disimpulkan bahwa faktor dimensi sangat mempengaruhi hasil dan koreksi pengukuran.

Kata kunci : Dimensi sampel, faktor koreksi, resistivitas, rapat arus, superkonduktor.

## PENDAHULUAN

Superkonduktor merupakan suatu bahan yang memiliki kemampuan mengalirkan arus listrik tanpa kehilangan energi. Fenomena ini telah dijelaskan melalui beberapa teori yang meliputi teori *Bardeen Cooper Schrieffer* (BCS) yang memperkenalkan teori pasangan elektron dengan pendekatan teori mekanika kuantum, teori *Resonance Valence Bond* yang dapat menerangkan mengapa dalam superkonduktor keramik transisi superkonduktivitas di sekitar suhu transisi kritis terjadi secara perlahan, teori *Ginzburg-Landau* yang menjadi dasar pengklasifikasian dua jenis superkonduktor, yaitu tipe-1 dan tipe-2, dan teori-teori lain yang berhasil menguak fenomena superkonduktivitas ini. Hal yang sangat menarik untuk dipahami adalah keadaan kritis bahan ini, yaitu suhu transisi kritis ( $T_c$ ), rapat arus kritis ( $J_c$ ), dan medan magnet kritis ( $H_c$ ).

Pada umumnya ada dua metode yang sering digunakan untuk mengukur keadaan kritis bahan superkonduktor, yaitu metode magnetisasi dan metode *four point probe* (MFPP). Untuk metode magnetisasi, ada beberapa model yang dapat menjelaskan hubungan antara magnetisasi dengan keadaan kritis bahan ini, diantaranya adalah model *Bean*, model *Kim* dan kawan-kawan, model *Wiesinger-Saverzopt-Weber* (WSW). Ketiga model di atas dalam penerapannya memiliki dimensi sampel dan faktor koreksi tertentu, sehingga setiap literatur ilmiah yang memanfaatkan metode ini pada umumnya mencantumkan model yang digunakan, dimensi sampel, dan faktor koreksinya [1,2,3].

Berbeda halnya dengan MFPP yang pada prinsipnya merupakan metode yang jauh lebih sederhana dibandingkan dengan metode magnetisasi, namun beberapa penulis literatur ilmiah sering sekali kurang memperhatikan dimensi sampel dan faktor koreksinya. Padahal peranannya sangat berarti dalam menentukan keadaan kritis bahan ini. Seperti yang dilaporkan oleh *Murakami* dan kawan-kawan[3], dengan menggunakan MFPP mereka mendapatkan harga  $J_c$  sebesar  $1500 \text{ A.cm}^{-2}$  pada suhu  $77 \text{ K}$  tanpa mencantumkan dimensi sampel dan faktor koreksinya. Begitu pula dengan *K.E. Oldenburg* dan kawan-kawan [4], dengan menggunakan MFPP mereka mendapatkan harga  $J_c$  sebesar  $0,74 \text{ A.cm}^{-2}$  dengan arus kritis  $I_c$  sebesar  $10 \text{ mA}$  pada suhu  $77 \text{ K}$  tanpa mencantumkan faktor koreksinya. Hal yang sama dilakukan oleh *Salama*, dan kawan-kawan [5], dengan MFPP telah berhasil mendapatkan  $J_c$  sebesar  $18500 \text{ A.cm}^{-2}$  tanpa menjelaskan faktor koreksinya. Dengan demikian diperlukan suatu bukti ilmiah yang menunjukkan pentingnya dimensi sampel dan faktor koreksi tersebut.

Pada makalah terdahulu telah dijelaskan beberapa teknik pengukuran sifat listrik bahan ini dengan menggunakan MFPP [6,7], dengan segala keunggulan dan kelemahannya, namun masih merupakan bahan mentah yang belum secara rinci dijelaskan pengaruh dimensi sampel dan faktor koreksinya terhadap hasil pengukuran. Hal ini disebabkan karena cakupan teorinya cukup banyak sehingga diperlukan pembahasan khusus mengenai teori ini.

Data mentah tersebut meliputi hasil pengukuran  $T_c$  yang merupakan kurva hubungan antara perubahan tegangan terhadap suhu (V-T), dan hasil pengukuran  $J_c$  yang merupakan kurva hubungan antara perubahan tegangan terhadap arus (V-I).

Berangkat dari penelitian-penelitian sebelumnya, maka pada penelitian ini akan dilakukan beberapa kajian teoritik dan penerapannya untuk menjelaskan pengaruh dimensi sampel terhadap faktor koreksi kurva (V-T) selanjutnya berubah menjadi kurva ( $\rho$ -T) dan kurva (V-I) yang kemudian berubah menjadi kurva (V-J). Jadi tujuan dari penulisan makalah ini adalah memberikan teori sekaligus menjelaskan pengaruh dimensi sampel terhadap faktor koreksi hasil pengukuran resistivitas ( $\rho$ ) dan rapat arus (J) superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . Sehingga dengan menggunakan beberapa sampel yang berbeda dimensi akan didapatkan hasil yang sama terutama untuk kedua pengukuran di atas. Jadi dengan mengacu pada teori tersebut diharapkan dapat memberikan solusi pada para peneliti agar tidak terpaku pada standarisasi bentuk dan dimensi sampel sehingga penelitian-penelitian di bidang ini tidak mengalami kendala dalam mempersiapkan dimensi sampel yang akan diukur.

## TEORI [8,9,10,11]

Diketahui bahwa rapat arus didefinisikan sebagai hasil kali konduktivitas bahan dengan medan listrik.:

$$J = \sigma \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Dimana  $\sigma$  adalah konduktivitas bahan dan  $\varepsilon$  adalah medan listrik. Apabila rapat arus  $J=I/A$ , konduktivitas bahan  $\sigma=1/\rho$ , dan medan listrik  $\varepsilon=V/x$ , maka persamaan di atas dapat direduksi menjadi :

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{V}{x} \quad (2)$$

Dengan A adalah luas bidang yang ditembus arus. Sesuai dengan hukum ohm bahwa  $R=V/I$  maka :

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{x}{A} \quad (3)$$

Dimana  $x$ ,  $A$ , dan  $\rho$  berturut-turut adalah panjang, luas penampang, dan resistivitas bahan. Tampak pada persamaan (3) bahwa perubahan resistansi sebanding dengan perubahan panjang dan luas bidang yang dilewati arus bahan tersebut. Persamaan (3) dapat dituliskan dalam bentuk:

$$\Delta R = \rho \left( \frac{dx}{A} \right) \quad (4)$$

Untuk bahan logam, suhu mempengaruhi harga resistivitas bahan tersebut, sehingga berdasarkan *Matthiessen's rule* dituliskan :

$$\rho(T) = \rho_0 + \alpha T \quad (5 a)$$

Dimana  $\rho(T)$ ,  $\rho_0$ ,  $\alpha$ , dan  $T$  berturut-turut adalah resistivitas bahan pada suhu  $T$ , resistivitas mula-mula, gradien, dan suhu bahan. Dan prosentase akurasi (PA) :

$$PA\% = \left( 1 - \frac{|\bar{\alpha} - \alpha|}{\bar{\alpha}} \right) \times 100\% \quad (5 b)$$

### Metode *four point probe* (*probe* empat titik)

Untuk mengamati sifat listrik suatu bahan biasanya digunakan metode *four point probe* (*probe* empat titik). Disebut *probe* empat titik, karena ada empat titik kontak yang disentuhkan pada permukaan sampel. Keempat titik kontak (*probe*) itu dibuat berderet dalam satu garis lurus dengan jarak antar *probe* diatur sedemikian rupa sehingga satu sama lain mempunyai jarak yang sama. Arus listrik yang konstan dialirkan sepanjang permukaan sampel melalui dua *probe* terluar. Jika sampel mempunyai resistansi, maka akan ada penurunan tegangan ketika arus mengalir sepanjang sampel tersebut. Perubahan tegangan tersebut diukur melalui dua *probe* bagian dalam [8,10]. Besaran fisis yang menunjukkan fenomena superkonduktivitas bahan, seperti suhu tansisi kritis ( $T_c$ ), rapat arus kritis ( $J_c$ ), dan medan magnet kritis ( $H_c$ ) dapat ditentukan secara teliti dengan metode *four point probe* tersebut. Skema dari *four point probe* tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.

### Resistivitas ( $\rho$ ) Sampel berbentuk *Bulk*

Pada awalnya kita asumsikan bahwa ujung *probe* sangat kecil (*infinitesimal*) dan sampel mempunyai dimensi yang besar (*semi-infinit*). Untuk sampel *bulk* ini mempunyai ketentuan bahwa ketebalan sampel ( $t$ ) harus lebih besar dibandingkan dengan jarak antara *probe* ( $s$ ). Jadi secara matematis dapat dikatakan bahwa  $t > \frac{3}{2} s$  [8]. Sehingga pada ujung *probe* paling luar, arus mengalir membentuk pola setengah bola seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Oleh karena itu luasan bidang yang dialiri arus dapat diformulasikan  $A = 2\pi x^2$  (luasan untuk setengah bola), dimana  $x$  adalah jari-jari bola. Jadi differensial dari persamaan (4) membentuk persamaan integral antara ujung *probe* bagian dalam menjadi :

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \rho \frac{dx}{2\pi x^2} = \int_s^{2s} \rho \frac{dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left( -\frac{1}{x} \right) \Big|_s^{2s} = \frac{1}{2s} \frac{\rho}{2\pi} \quad (6)$$

Karena pada dua ujung probe paling luar merupakan superposisi dari arus maka  $R=V/2I$ . Jadi dapat kita simpulkan bahwa resistivitas bahan untuk sampel berbentuk *bulk* adalah

$$\rho = 2\pi s \left( \frac{V}{I} \right) \quad (7)$$

dimana  $s$  adalah jarak antar *probe*.

### Sampel berbentuk *Thick sheet*

Berbeda dengan sampel *bulk*, untuk sampel berbentuk *thick sheet* ini mempunyai ketentuan bahwa ketebalan sampel ( $t$ ) harus lebih kecil dibandingkan dengan jarak antar *probe* ( $s$ ). Jadi secara matematis dapat dikatakan bahwa  $t < \frac{3}{2} s$  [8]. Sehingga pada ujung *probe* paling luar, arus mengalir membentuk pola menyerupai lingkaran sebagai pengganti bola seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, dengan luasan bidang yang dialiri arus dapat diformulasikan  $A = 2\pi xt$ , dimana  $x$  adalah jari-jari bola dan  $t$  adalah ketebalan sampel.

Sehingga persamaan (4) menjadi :

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \rho \frac{dx}{2\pi xt} = \int_s^{2s} \frac{\rho}{2\pi t} \frac{dx}{x} = \frac{\rho}{2\pi t} \ln(x) \Big|_s^{2s} = \frac{\rho}{2\pi t} \ln 2 \quad (8)$$

Jadi dapat kita simpulkan bahwa resistivitas bahan untuk sampel berbentuk *thick sheet* adalah

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \left( \frac{V}{I} \right) \quad (9)$$

dimana  $t$  adalah ketebalan sampel.

## Rapat Arus (J) Sampel berbentuk *Bulk*

Rapat arus didefinisikan sebagai arus yang mengalir persatuan luas,  $J = I/A$ . Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 bahwa arus mengalir membentuk pola setengah bola, sehingga luas penampang yang dilewati arus tersebut (merupakan irisan bidang yang tegak lurus dengan ujung *probe* paling dalam) berupa luasan setengah lingkaran dengan jari-jari  $x$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Sesuai dengan hukum Phytagoras kita dapatkan besarnya harga  $x$ , yaitu :

$$\begin{aligned} (3/2 s)^2 &= (1/2 s)^2 + x^2 \\ x &= \sqrt{2}s \end{aligned} \quad (10)$$

dimana  $x$  adalah jari-jari lingkaran dari irisan bidang yang tegak lurus dengan ujung *probe* paling dalam. Sehingga luas penampang yang dilewati arus :

$$A = 1/2\pi x^2 = 1/2\pi(\sqrt{2}s)^2 = \pi s^2 \quad (11)$$

Jadi dapat kita simpulkan bahwa rapat arus bahan untuk sampel *bulk* adalah

$$J = \frac{I}{\pi s^2} \quad (12)$$

## Sampel berbentuk *Thick sheet*

Rapat arus untuk sampel berbentuk *thick sheet*, pada dasarnya sama dengan sampel *bulk*, namun karena dibatasi dengan ketebalan sampel yang cukup kecil maka diasumsikan bahwa luasan bidang yang ditembus arus (irisian bidang yang tegak lurus dengan ujung *probe* paling dalam) yang dilewati arus berbentuk persegi panjang dengan panjang  $p$  dan lebar  $t$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Sesuai persamaan (10) dan  $p = 2x$  maka luas penampang yang dilewati arus adalah

$$A = p.t = 2 x.t = 2\sqrt{2} s.t \quad (13)$$

Jadi dapat kita simpulkan bahwa rapat arus bahan untuk sampel berbentuk *thick sheet* adalah

$$J = \frac{I}{2\sqrt{2}st} \quad (14)$$

# BAHAN DAN TATA KERJA

## Bahan

Pada kegiatan ini dipersiapkan sampel *bulk* dan sampel *thick sheet* superkonduktor sistim YBCO (123). Sintesis dari kedua sampel ini telah dilakukan pada pekerjaan sebelumnya menggunakan metode reaksi padatan [11]. Sampel berbentuk pellet sebanyak 5 buah, yaitu sampel A, B, C, D, dan E. Sampel A dan B yang selanjutnya berturut-turut mewakili sampel *bulk* 1 dan *bulk* 2, sampel C dan D yang selanjutnya berturut-turut mewakili sampel *thick sheet* 1 dan *thick sheet* 2, dan sampel E yang digunakan untuk pengujian *Efek Meissner*. Adapun dimensi sampel dapat dilihat pada Tabel 1.

## Tata kerja

Karena kelima sampel dibuat dari prekursor dan kondisi perlakuan panas yang sama, maka sebelum keempat sampel A, B, C, dan D diukur sifat listriknya, sampel E yang dianggap mewakili kelima sampel tersebut diuji dulu efek *Meissner*nya, kemudian sampel A, B, C, dan D, masing-masing diukur suhu transisi kritisnya untuk menentukan resistivitas bahan dari suhu 77 K sampai 200 K dan rapat arus kritisnya pada suhu 77 K. Sehingga diharapkan dengan pengukuran keempat sampel yang berbeda dalam bentuk dan dimensi ini dapat menghasilkan data yang sama dan akurat.

Pengukuran sifat listrik bahan digunakan metode probe empat titik yang lebih populer disebut dengan *four point probe*. Teknik pengukuran sifat listrik ini telah banyak disinggung pada makalah terdahulu [6,7]. Sebelum dilakukan pengukuran, sampel A, B, C, dan D perlu dipersiapkan dulu konfigurasi kontakannya. Pada penelitian ini telah dipersiapkan konfigurasi kontak, yaitu penanaman kawat perak ke dalam sampel [13,14,15]. Sistem pengukuran untuk kedua sampel ini menggunakan beberapa alat ukur diantaranya sumber arus dari 1  $\mu\text{A}$  – 10 mA (*YOKOGAWA 2554 DC Voltage Current Standard*), sumber arus dari 10 mA – 20 A (*THURLBY THANDAR TSX1820P Programmable DC Power Supply 18V*), voltmeter (*KEITHLEY 181 Nanovoltmeter*), dan kontrol suhu (*LAKE SHORE Cryotronics 201 Thermometer*). Beberapa alat ukur ini dikendalikan dengan komputer melalui panel depan (*IEEE 488 GPIB*). Sistem ini dirancang sedemikian rupa sehingga sampel mudah untuk diukur [6].

Untuk pengukuran resistivitas bahan, sampel A, B, C, dan D diberikan arus konstan masing-masing 10 mA, 1 A, dan 2 A, yang selanjutnya berturut-turut disebut dengan sampel AR1, AR2, AR3, BR1, BR2, BR3, CR1, CR2, CR3, dan DR1, DR2, DR3. Kemudian data masing-masing sampel dihitung sesuai dengan persamaan (7) dan persamaan (9) tersebut di atas, sehingga dapat diperoleh perbandingan hasil dari kedua sampel tersebut. Besarnya gradien  $\alpha$  pada persamaan (5 a) dapat ditentukan dengan mengambil data

resistivitas baik sampel A, B, C, maupun D pada suhu 100 K dan 200 K. Karena sampel terbuat dari prekursor dan kondisi perlakuan yang sama, maka diasumsikan bahwa  $\rho_0$  sama untuk setiap sampel. Sehingga dengan cara mengeliminasi dua persamaan pada suhu 100 K dan 200 K, maka akan kita dapatkan harga gradien  $\alpha$  yang dimaksud. Dengan demikian dapat diketahui pula seberapa jauh prosentase akurasi data hasil pengukuran ini melalui persamaan (5 b).

Untuk pengukuran rapat arus (J), sampel A, B, C, dan D berturut-turut disebut dengan sampel AJ, BJ, CJ, dan DJ. Metode pengukuran yang digunakan adalah metode peningkatan arus (MPA)[4,5,6,7]. Kemudian data masing-masing sampel dihitung sesuai dengan persamaan (12) dan persamaan (14), sehingga diperoleh juga perbandingan hasil dari kedua sampel tersebut.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran resistivitas sampel ini diperlihatkan pada Gambar 7 dan 8. Pada kurva V-T tampak terjadi perbedaan tegangan yang cukup besar seiring dengan meningkatnya arus masukannya. Hal ini merupakan fenomena Hukum Ohm bahwa pada resistansi yang sama apabila arus masukan dinaikkan maka tegangan sampel itu akan meningkat pula. Sehingga dengan memperhitungkan faktor dimensi sampel sesuai dengan persamaan (7) dan (9), maka akan diperoleh harga resistivitas yang cenderung sama untuk semua sampel seperti yang terlihat pada kurva  $\rho$ -T. Hasil perhitungan resistivitas tanpa koreksi seperti yang terlihat pada Tabel 2, tampak terdapat perbedaan yang sangat mencolok antara sampel yang berbentuk *bulk* dan *thick sheet*. Namun setelah dilakukan koreksi yaitu dengan melibatkan faktor dimensi sampel, harga resistivitas sampel baik yang berbentuk *bulk* maupun *thick sheet* cenderung sama dengan akurasi rata-rata sekitar 94 %. Hal ini disebabkan karena distribusi aliran elektron setiap sampel berbeda seperti yang telah dijelaskan pada dasar teori di atas.

Begitu juga seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9, kondisi kritis ini diperlihatkan pada saat bahan memiliki resistansi nol (*superconductor state*) menuju ke keadaan non superkonduksi. Selanjutnya bahan akan berperilaku seperti konduktor yang diindikasikan pada bentuk linieritas antara tegangan dengan arus. Hal ini sangat bersesuaian dengan kaidah Hukum Ohm, dimana tegangan (V) berbanding lurus dengan arus (I). Pada Gambar 9 dan Tabel 3, tampak bahwa arus kritis untuk masing-masing sampel sangat bervariasi. Perbedaan arus kritis ini disebabkan karena pada kondisi kritis bahan tersebut menurut teori BCS [16,17] terjadi perbedaan dalam pemutusan pasangan elektron (*depairing*) yang disebabkan oleh besarnya arus masukan disamping faktor dimensi sampel yang berbeda. Jadi semakin besar arus yang melewati bahan tersebut, maka semakin cepat pula pemutusan rantai pasangan elektron, sehingga elektron-elektron tersebut tidak lagi berpasangan. Karena

elektron-elektron tersebut bergerak sendiri-sendiri maka bahan ini berperilaku seperti halnya konduktor-konduktor yang lain. Dengan demikian terjadi hamburan elektron oleh ketidakteraturan kisi, sebagai contoh kontribusi tumbukan elektron dengan impuritas yang pada akhirnya akan menimbulkan resistansi pada bahan tersebut. Dengan kata lain bahwa dengan diberikannya arus eksternal yang berubah terhadap waktu pada bahan tersebut berarti sama juga menyumbangkan energi termal sebesar  $I^2Rt$ . Dan apabila energi termal yang diterima melebihi energi kinetik pasangan elektron seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada teori BCS maka terjadi pemutusan pasangan elektron menjadi elektron normal. Sehingga pada keadaan ini hubungan V-I bersifat Ohmik seperti halnya konduktor biasa. Karena distribusi aliran arus terhadap bahan melalui penampang yang berbeda-beda maka distribusi energi termal yang diterima setiap bahan juga berbeda-beda sehingga arus kritis  $I_c$  yang diperoleh juga sangat variatif. Namun dengan memperhitungkan faktor dimensi sampel sesuai dengan persamaan (12) dan (14) seperti yang terlihat pada Gambar 10 akan diperoleh harga rapat arus kritis yang cenderung sama pada semua sampel.

## KESIMPULAN

Kajian teoritik berupa perumusan koreksi harga pengukuran resistivitas dan rapat arus dengan metode *four point probe* telah digunakan untuk analisis kurva V-T dan kurva V-I dari sampel polikristal superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . Pengukuran resistivitas dan rapat arus dengan menggunakan metode *four point probe* sangat dipengaruhi oleh faktor dimensi sampel yang meliputi luas permukaan sampel, tebal sampel, dan jarak antara *probe* ( $s$ ). Dari analisis tersebut diperoleh suhu transisi kritis bahan  $T_c = 91$  K dengan arus  $I = 10$  mA, rapat arus kritis  $J_c = 45$  A.cm<sup>-2</sup>, resistivitas pada suhu 100 K berkisar  $\rho_{100} = 5$  m $\Omega$ .cm, resistivitas pada suhu 200 K berkisar  $\rho_{200} = 6$  m $\Omega$ .cm, dan gradien berkisar  $\alpha = 1$  m $\Omega$ .cm.K<sup>-1</sup>.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini dibiayai oleh anggaran DIP tahun 1999/2000. Terimakasih disampaikan kepada Bapak DR Wuryanto selaku Ka. P3IB, DR Ridwan selaku Ka. Bidang Zat Mampat atas segala kepercayaan dan pengarahannya, dan Drs Bambang Sugeng, M.T. atas bantuannya dalam mengkarakterisasi sampel dengan menggunakan difraksi sinar-x.

## DAFTAR PUSTAKA

1. EKIN, J.W., SALAMA, K., SEVAMANICKAM, V., *High-Transport Current Density up to 30 T in Bulk  $YBa_2Cu_3O_7$  and The Critical Angle Effect*, Appl. Phys. Lett. 59 (3) July 15 (1991)
2. JIN, S., TIEFEL, T.H., NAKAHARA, S., GRAEBNER, J.E., O'BRYAN, H.M., FASTNACHT, R.A., KAMMLOTT, G.H., *Enhanced Flux Pinning By Phase Decomposition in Y-Ba-Cu-O*, Appl. Phys., Lett. 56 (13) March 26 (1990)
3. MURAKAMI, M.A., MORITA, M., DOI, K., MIYAMOTO, K., *A New Process with The Promise of High  $J_c$  in Oxide Superconductors*, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 28 (7) July (1989) 1184-1194
4. OLDEBURG, K.E., MORISON, W.A., BROWN, G.C., *Critical Current Density of  $YBa_2Cu_3O_7$* , Am. J. Phys. 61 (9) September (1993)
5. SALAMA, K., SEVAMANICKAM, V., GAO, L., SUN, K., *High Current Density in Bulk  $YBa_2Cu_3O_7$  Superconductor*, Appl. Phys. Lett. 54 (23) June 5 (1989)
6. WISNU, A.A., SUKIRMAN, E., *Juklak Pemakaian Alat Ukur Rapat Arus Kritis ( $J_c$ ) dan Suhu Transisi Kritis ( $T_c$ ) Superkonduktor dengan menggunakan Metoda Four Point Probe*, Lporan Teknis BZM-P3IB BATAN, Serpong (1999)
7. WISNU, A.A., SUKIRMAN, E., WINATAPURA, D.S., *Teknik Pengukuran Rapat Arus Kritis Bulk Superkonduktor  $T_c$  Tinggi dengan Metode Ekstrapolasi Linier*, disajikan pada Seminar Sains dan Teknologi Nuklir, P3TN, Bandung, 11-12 Juli (2000)
8. JAMES CHAN, *EEC 143 Processing and Design of Integrated Circuits, Four Point Probe Manual*, University of California (1994)
9. BARMAWI, M., *Diktat Fisika Semikonduktor*, Jurusan Fisika Institut Teknologi Bandung, Bandung (1989)
10. *Experiment Guide for Superconductor Demonstration*, Colorado Superconductor Inc., Colorado, alih bahasa oleh Drs. Engkir Sukirman, M.Sc., dan Wisnu Ari Adi, S.Si., P3IB BATAN (1999)
11. REKA RIO, S., MASAMORI, I., *"Fisika dan Teknologi Semikonduktor"*, PT Pradnya Paramita, Jakarta (1982) 48-50
12. SUKIRMAN, E., *Pengaruh Distribusi Kekosongan Oksigen pada Superkonduktivitas  $YBa_2Cu_3O_7$* , Thesis Master Fakultas Pasca Sarjana Universitas Indonesia (1991)

13. EKIN, J.W., BOULDER, COLO, PANSON, A.J., BETTY, *High Tc Superconductor Contact Unit Having Low Interface Resistivity, And Method of Making*, Appl. (274.881) USA, November 22 (1988)
14. 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., *Low- Resistivity Contacts to Bulk High Tc Superconductors*, Appl. Phys. Lett. 54 (25) June 19 (1989) 2605-2608
15. VAN DER MAAS, J., GASPAROV, V.A., PAVUNA, D., *Improved Low Contact Resistance in High-Tc Y-Ba-Cu-O ceramic superconductors*, Nature 328, August 13 (1987) 603
16. BUCKEL, W., "Superconductivity", VCH Publisher Inc., New York (1991) 29-36
17. MOON, F.C., "Superconducting Levitation", John Wiley & Son, Inc., New York (1994) 73-77

Tabel 1. Kode dan dimensi sampel.

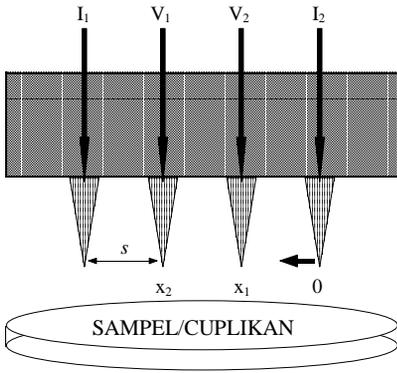
Sampel		Dimensi		Jarak antar probe ( <i>s</i> ) (mm)
Kode	Bentuk	Diameter (mm)	Tebal, <i>t</i> (mm)	
A	<i>Bulk</i>	14,3	5,3	1,8
B	<i>Bulk</i>	19,2	5,9	2,0
C	<i>Thick sheet</i>	14,3	2,0	2,0
D	<i>Thick sheet</i>	19,2	1,5	2,0
E	<i>Bulk dan serbuk</i>	-	-	-

Tabel 2. Nilai Tegangan dan Resistivitas yang diukur pada suhu 100 K dan 200 K.

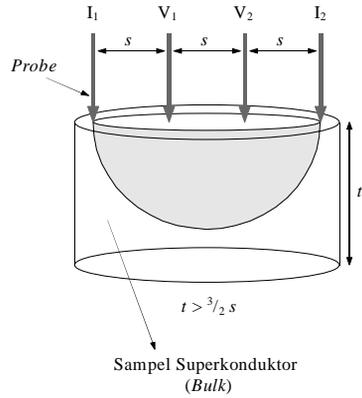
Sampel		Tegangan (mV)		Resistivitas (m $\Omega$ .cm) tanpa koreksi		Resistivitas (m $\Omega$ .cm) dengan koreksi		Gradien $\alpha$ (m $\Omega$ .cm. K <sup>-1</sup> )	Akurasi (%)	Tc (K)
Kode	Arus	V <sub>100</sub>	V <sub>200</sub>	$\rho_{100}$	$\rho_{200}$	$\rho_{100}$	$\rho_{200}$			
AR1	10 mA	0,051	0,060	2,70	3,18	5,75	6,78	1,03	93,2	91,2
AR2	1 A	4,927	6,139	2,61	3,25	5,57	6,94	1,37	90,3	87,2
AR3	2 A	10,262	11,660	2,72	3,09	5,80	6,59	0,79	91,8	84,1
BR1	10 mA	0,046	0,053	2,71	3,13	5,77	6,68	0,91	92,7	91,4
BR2	1 A	4,682	5,366	2,76	3,17	5,88	6,74	0,86	92,2	88,2
BR3	2 A	8,790	10,780	2,59	3,18	5,52	6,77	1,25	95,7	83,6
CR1	10 mA	0,062	0,074	1,24	1,48	5,60	6,70	1,1	99,7	90,6
CR2	1 A	6,290	7,228	1,26	1,45	5,70	6,55	0,85	92,1	88,5
CR3	2 A	11,852	14,853	1,19	1,49	5,37	6,73	1,36	90,2	85,5
DR1	10 mA	0,080	0,097	1,20	1,46	5,44	6,62	1,18	99,5	90,9
DR2	1 A	7,901	9,946	1,19	1,49	5,37	6,67	1,39	90,1	87,3
DR3	2 A	15,920	19,186	1,19	1,44	5,41	6,52	1,11	99,7	83,5

Tabel 3 : Nilai arus kritis dan rapat arus kritis yang diukur pada suhu 77 K.

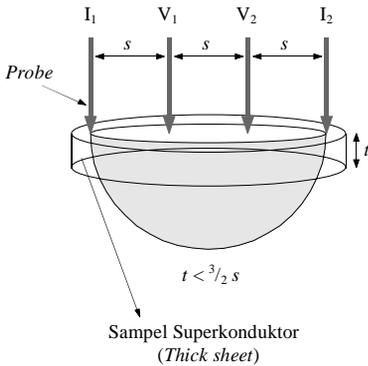
Kode Sampel	Arus Kritis, I <sub>c</sub> (A)	Rapat Arus Kritis, J <sub>c</sub> (A.cm <sup>-2</sup> ) tanpa koreksi	Rapat arus kritis, J <sub>c</sub> (A.cm <sup>-2</sup> ) dengan koreksi
AJ	4,62	16,14	45,41
BJ	5,70	16,10	45,38
CJ	5,12	42,67	45,26
DJ	3,83	42,56	45,14



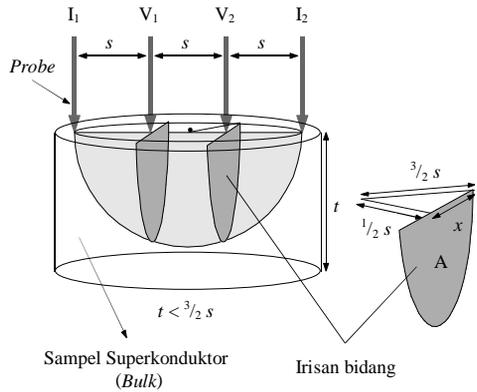
Gambar 1. Skematis dari *four point probe*.



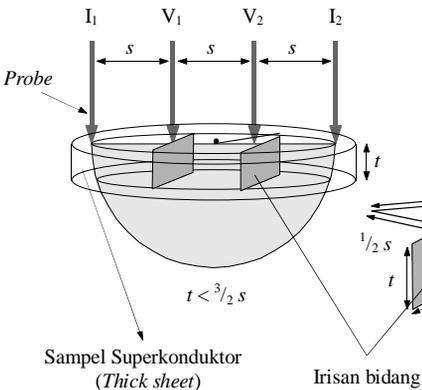
Gambar 2. Pola aliran arus untuk sampel ber-bentuk *bulk*.



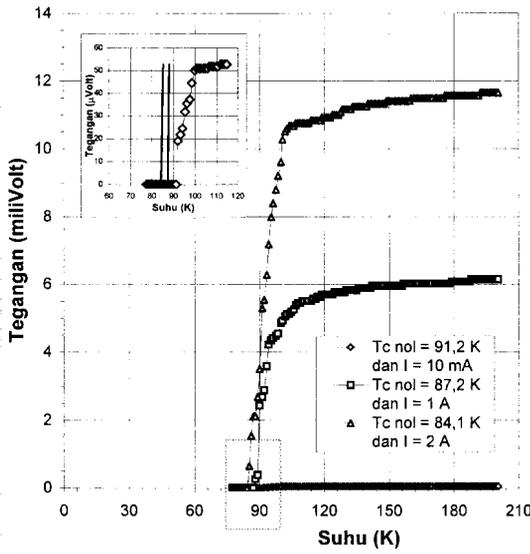
Gambar 3. Pola aliran arus untuk sampel berbentuk *thick sheet*.



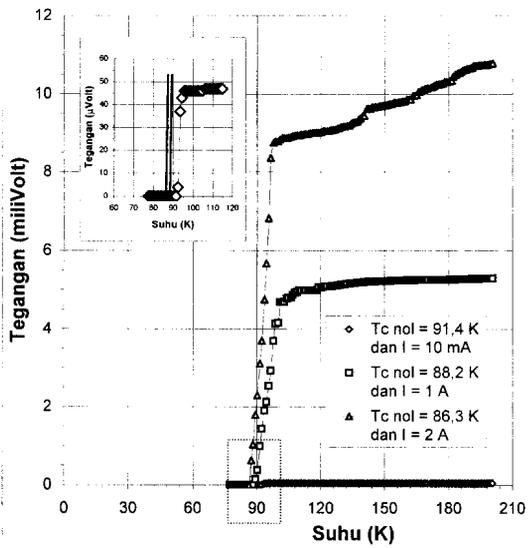
Gambar 4. Luas penampang yang dilewati arus untuk sampel *bulk*.



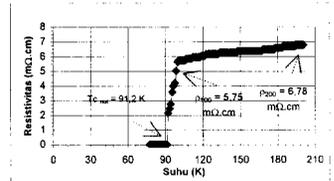
Gambar 5. Luas penampang yang dilewati arus untuk sampel *thick sheet*.



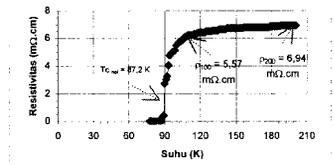
(1)



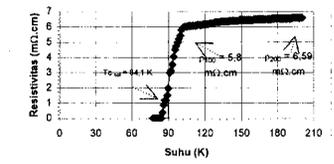
(2)



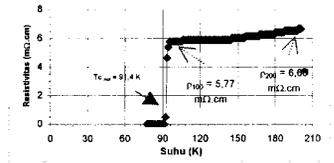
(a)



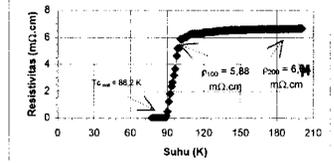
(b)



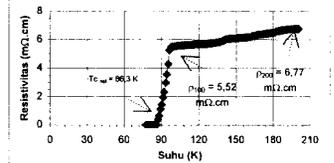
(c)



(d)

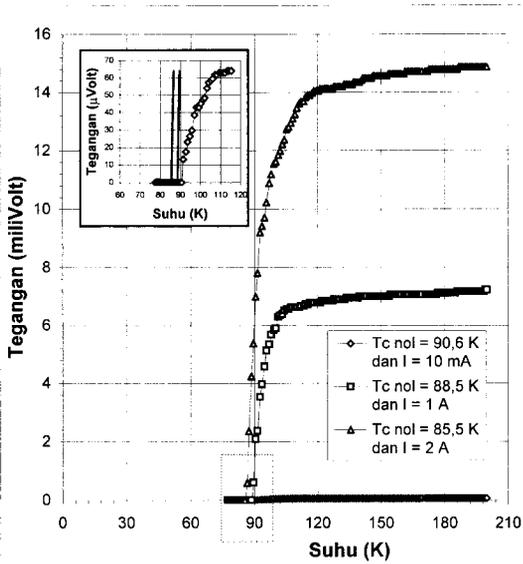


(e)

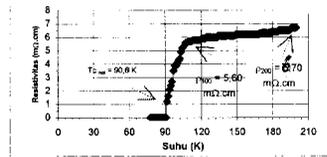


(f)

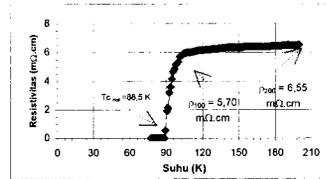
Gambar 7. (1) Kurva V-T untuk sampel A, (a) Kurva  $\rho$ -T pada  $I = 10\text{ mA}$ , (b)  $I = 1\text{ A}$ , (c)  $I = 2\text{ A}$ .  
 (2) Kurva V-T untuk sampel B, (a) Kurva  $\rho$ -T pada  $I = 10\text{ mA}$ , (b)  $I = 1\text{ A}$ , (c)  $I = 2\text{ A}$ .



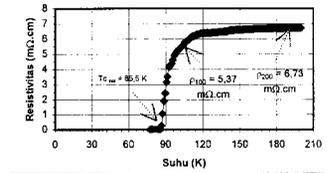
(1)



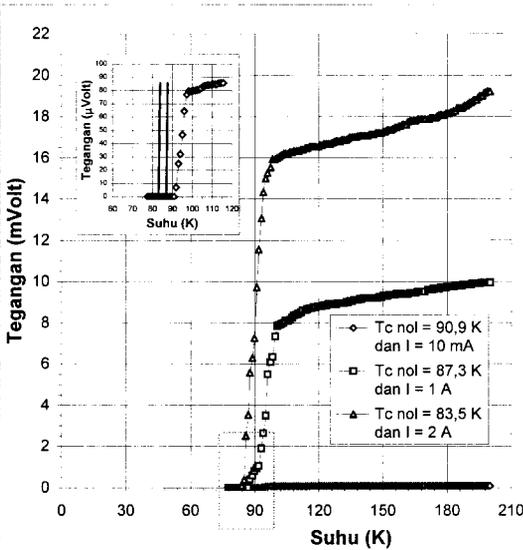
(a)



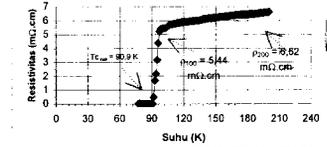
(b)



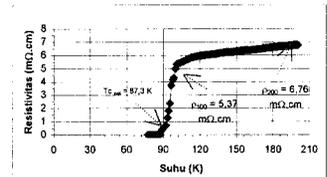
(c)



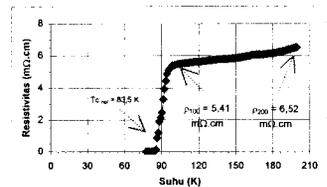
(2)



(d)

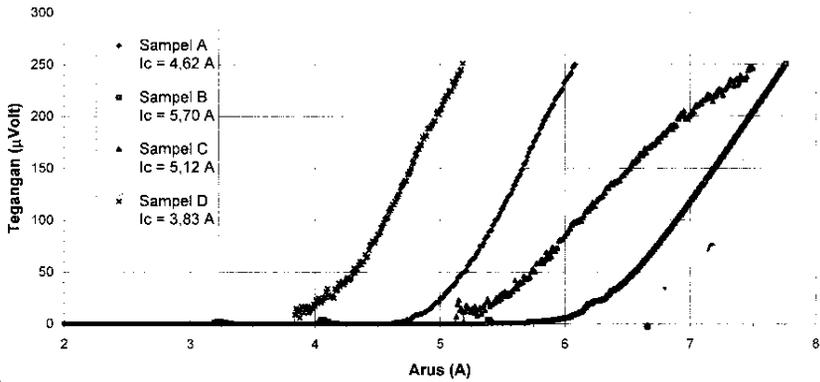


(e)

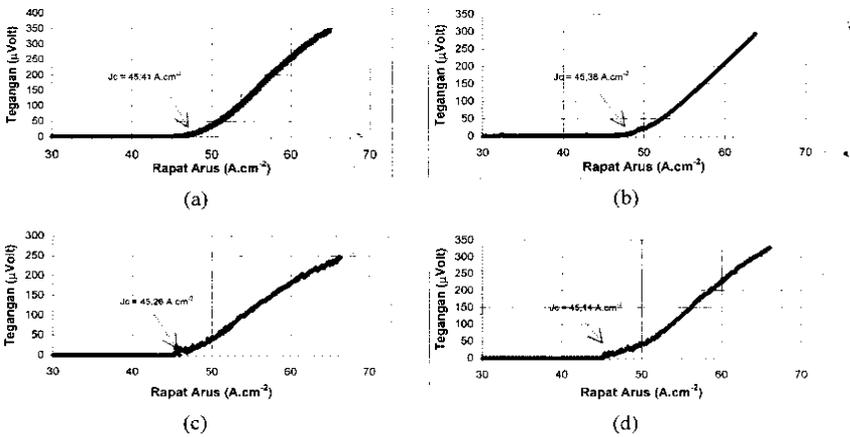


(f)

Gambar 8. (1) Kurva V-T untuk sampel C, (a) Kurva  $\rho$ -T pada  $I = 10\text{mA}$ , (b)  $I = 1\text{A}$ , (c)  $I = 2\text{A}$ .  
 (2) Kurva V-T untuk sampel D, (a) Kurva  $\rho$ -T pada  $I = 10\text{mA}$ , (b)  $I = 1\text{A}$ , (c)  $I = 2\text{A}$ .



Gambar 9. Kurva V-I untuk sampel A, B, C, dan D.



Gambar 10. Kurva V-J (a) sampel A, (b) sampel B, (c) sampel C, dan (d) sampel D.