

PENGARUH INKLUSI FASA-211 TERHADAP SIFAT LISTRIK SUPERKONDUKTOR $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

E. Sukirman¹⁾, W. Ari Adi¹⁾, D. S. Winatapura¹⁾ dan Yustinus¹⁾

ABSTRACT

Effect of the 211-phase inclusion to the electrical properties of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconductor grown by a melt-texturing process has been investigated. The qualitative and quantitative analysis was carried out by the x-ray diffraction technique using the Rietveld method and the electrical properties were investigated by the four point probe method. The analysis results show that the highest critical current density was obtained on the 123-phase matrix containing 35 weight % of the 211-phase. Due to the 211-inclusion in the 123-phase, the flux flow phenomenon does not longer exist. The critical current J_c in the 123-phase increase on account of the 211-inclusion, where as the J_c tend to increase with increasing the 211-phase content. The further of 211-phase increase, however, lead to a decrease of J_c value.

Kata kunci : Fasa-211 Inclusion, YBCO Electrical Properties.

PENDAHULUAN

High T_c Superconductor (HTS), yakni superkonduktor oksida Y-Ba-Cu-O (YBCO), Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO) dan Tl-Ba-Ca-Cu-O (TBCCO), sangat menarik untuk diaplikasikan, karena bahan-bahan itu dapat menghantarkan arus super pada suhu nitrogen cair ($T = 77$ K). Aplikasi HTS jauh lebih ekonomis dan lebih praktis dibandingkan dengan aplikasi superkonduktor logam (*Low T_c Superconductor*) yang beroperasi pada suhu helium cair ($T = 4$ K). Namun demikian aplikasi HTS terkendala oleh rendahnya rapat arus bahan tersebut, akibat lemahnya *link* antara batas-batas butir kristal dan tidak adanya pusat-pusat jepitan yang berfungsi sebagai penghambat pergerakan vorteks terhadap gaya Lorentz $F_L = J \times B$, dimana J dan B berturut-turut adalah rapat arus dan intensitas medan magnet eksternal.

Link antara batas-batas butir dapat

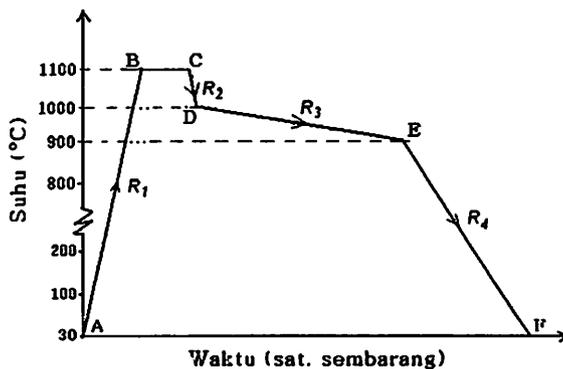
diperkuat dengan pengorientasian butir-butir kristal (menumbuhkan tekstur), yang mana hal ini bisa dicapai dengan proses pelelehan [1]. Sedangkan penjepitan vorteks dilakukan dengan menanamkan inklusi berupa partikel-partikel kecil fasa hijau Y_2BaCuO_5 di dalam matrik Fasa-123. Partikel fasa hijau inilah yang akan menjepit vorteks sehingga vorteks tidak dapat bergeser tanpa terlebih dahulu mendapat tambahan energi yang besar [2].

Adanya peningkatan rapat arus kritis J_c dalam $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Fasa-123) yang dibuat dengan teknik pelelehan telah dilaporkan oleh beberapa peneliti terdahulu [3-13]. Walaupun terdapat banyak variasi pelelehan, namun semua variasi tersebut pada dasarnya terdiri dari dua proses, yakni proses pembentukan Fasa-123 dari Fasa-211 dan pembentukan fasa cair ($BaCuO_2 + CuO$) melalui proses-pendinginan lambat melewati suhu peritektik ($T_p \approx 1000^\circ C$) dalam lingkungan udara. Struktur

¹⁾ Peneliti PBIN – BATAN, Puspiptek, Cisauk 15314
Tangerang, Banten. Telp. / Fax : 021-7650148, E-mail : skm2792@batan.go.id

mikro cuplikan hasil proses pelelehan terdiri dari domain-domain Fasa-123 yang besar berbentuk pelat-pelat sejajar.

Pada penelitian terdahulu [14], proses pelelehan $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ dilakukan berdasarkan skema pada Gambar 1. Cuplikan $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ hasil proses sintering di bakar di dalam tungku pada 1100°C selama $t_a = 0,2$ jam (B-C), laju pemanasan $R_1 = 300^\circ\text{C}/\text{jam}$. Cuplikan kemudian didinginkan ke 1000°C dengan laju $R_2 = 400^\circ\text{C}/\text{jam}$. Selanjutnya didinginkan secara lambat ke 900°C dengan laju R_3 dan kemudian didinginkan lagi dengan laju $R_4 = 60^\circ\text{C}/\text{jam}$ hingga suhu ruang dalam lingkungan udara. Hasil analisis menunjukkan bahwa rapat arus tertinggi $J_c = 115 \text{ A}/\text{cm}^2$, diperoleh pada cuplikan dengan $R_3 = 10^\circ\text{C}/\text{jam}$ dan di dalam matriks Fasa-123 terdapat 0,4 % Fasa-211. Pada penelitian ini berhasil ditunjukkan bahwa struktur mikro Fasa-123 hasil proses pelelehan terdiri dari butir-butir berbentuk pelat-pelat yang terorientasi ke satu arah (pelat sejajar). Hingga tahap ini, penyebab rendahnya J_c diduga akibat masih sedikitnya jumlah kandungan Fasa-211.



Gambar 1. Proses pelelehan $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

Pada penelitian selanjutnya [15], didapat $J_c = 230 \text{ A}/\text{cm}^2$ dan di dalam matriks terdapat 35,8 % Fasa-211. Tampak bahwa kandungan Fasa-211 di dalam matriks telah meningkat 89 kali, namun J_c hanya meningkat 2 kali dari

harga sebelumnya [14]. Dugaan yang muncul kemudian adalah boleh jadi ada batasan jumlah kandungan optimum Fasa-211 di dalam matriks Fasa-123 agar diperoleh J_c maksimum. Disamping itu muncul pertanyaan, kenapa perbedaan jumlah kandungan Fasa-211 sangat besar pada kedua penelitian tersebut, padahal kondisi perlakuan panas sama.

Konfirmasi bahwa di dalam matriks Fasa-123 hasil proses pelelehan terbentuk Fasa-211 yang cukup besar, telah dilakukan pada penelitian berikutnya [16], dalam hal ini diperoleh angka 20,9 % Fasa-211. Namun demikian, pada eksperimen tersebut [16], sifat listrik cuplikan tidak diamati, sehingga konfirmasi harga J_c dan indikasi tentang adanya jepitan fluks belum bisa ditunjukkan. Tujuan penelitian sekarang adalah untuk mempelajari pengaruh inklusi Fasa-211 terhadap sifat listrik superkonduktor untuk dapat menunjukkan adanya korelasi yang erat antara J_c dan kandungan Fasa-211 di dalam matriks Fasa-123. Cuplikan akan memiliki J_c tertinggi jika di dalam domain-domain Fasa-123 tersebut terdapat sejumlah tertentu presipitat Fasa-211.

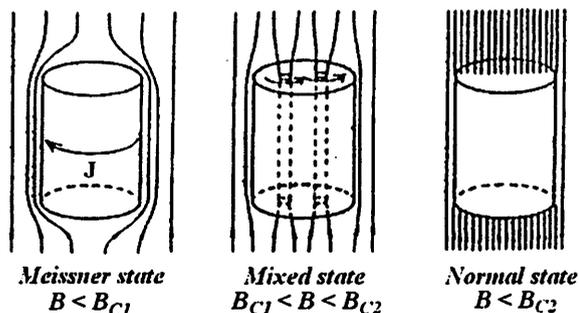
LANDASAN TEORI

1. Pusat Jepitan Vorteks

Suatu bahan disebut superkonduktor jika menampilkan dua sifat, yakni tidak memiliki resistivitas, $\rho = 0$ pada suhu $T < T_c$ dan induksi magnet, $B = 0$ di dalam superkonduktor. Resistivitas nol, atau dengan kata lain konduktivitas tak berhingga, teramati pada suhu di bawah suhu kritis T_c . Namun demikian jika pada bahan dilewatkan arus yang lebih tinggi dari pada rapat arus kritis J_c , superkonduktivitas bahan akan hilang. Demikian pula, ketika superkonduktor didinginkan hingga di bawah T_c dalam lingkungan medan magnet eksternal yang lemah, maka kuat medan magnet di dalam superkonduktor menjadi nol, artinya fluksi magnetik ditolak dari bagian dalam

superkonduktor. Perlu dicatat juga bahwa akan selalu ada kuat medan magnet kritis B_c , sehingga jika medan magnet eksternal melebihi B_c maka superkonduktivitas bahan hilang. Efek penolakan medan magnet ini disebut efek Meissner-Ochsenfeld dan bahan berada dalam keadaan Meissner (*Meissner state*) [2].

Ada dua tipe superkonduktor, yakni superkonduktor tipe-I dan tipe-II. Superkonduktor tipe-I adalah superkonduktor yang menghalau seluruh fluksi magnetik atau sama sekali tidak mampu mengusir fluksi magnetik sehingga bahan akhirnya menjadi normal kembali. Medan yang diperlukan untuk menghilangkan superkonduktivitas cuplikan disebut medan kritis B_c . Pada superkonduktor tipe-II ada dua medan kritis, yakni medan kritis bawah, B_{c1} dan medan kritis atas, B_{c2} . Pengusiran seluruh fluksi magnetik dari bahan superkonduktor hanya terjadi hingga medan B_{c1} . Jadi jika medan terpasang lebih kecil B_{c1} , superkonduktor tipe-II berperilaku persis seperti superkonduktor tipe-I di bawah B_c . Jika medan terpasang berkekuatan antara B_{c1} dan B_{c2} , fluksi magnetik sebagian menembus ke dalam bahan. Antara B_{c1} dan B_{c2} superkonduktor dikatakan ada dalam keadaan tercampur (*mixed state*). Di atas B_{c2} bahan kembali ke keadaan normal (*normal state*). Penetrasi fluksi magnetik pada superkonduktor tipe-II ditunjukkan pada Gambar 2 [2].



Gambar 2. Penetrasi fluksi magnetik pada superkonduktor tipe-II.

Pada daerah medan magnet terpasang : $B_{c1} < B < B_{c2}$, fluksi magnetik sebagian menembus cuplikan superkonduktor dalam bentuk filamen-filamen mikroskopik kecil yang disebut vorteks. Diameter vorteks pada superkonduktor konvensional adalah sekitar 100 nm. Vorteks terdiri dari teras normal, dimana medan magnet yang besar menembus teras tersebut. Vorteks dikelilingi oleh daerah superkonduksi, pada daerah superkonduksi mengalir arus super, arus super tersebut berperan mempertahankan medan di dalam teras. Setiap vorteks membawa fluksi magnetik sebesar : $\Phi_0 = 2,067 \times 10^{-15}$ Weber dan induksi magnet B dikaitkan secara langsung dengan jumlah vorteks per m^3 (n) melalui persamaan :

$$B = n \Phi_0 \tag{1}$$

Jika bahan dialiri arus listrik, arus akan menggeser vorteks-vorteks. Vorteks yang sedang bergerak menciptakan medan listrik E yang memenuhi persamaan :

$$E = d\Phi/dt \tag{2}$$

Akibat adanya medan listrik tersebut, maka arus J melepaskan (*to dissipate*) energi sebesar $E.J$. Disipasi energi ini ekuivalen dengan resistivitas $\rho > 0 \Omega.cm$. Perlu usaha agar arus yang lebih besar tetap dapat dialirkan tanpa terjadi disipasi energi di atas B_{c1} . Caranya adalah dengan menjaga agar vorteks-vorteks tidak bergerak atau sekurang-kurangnya tidak mudah bergerak ketika arus dialirkan. Hal ini dapat dicapai dengan menjepit vorteks-vorteks atau menjepit fluksi magnetik.

Adanya penembusan sebagian fluksi magnetik ke dalam bahan ternyata menguntungkan, karena bahan menjadi mampu menahan medan magnet yang besar tanpa harus kembali ke keadaan normal. Medan kritis B_{c2}

bisa mencapai 150 T (pada HTS). Pada medan yang lebih besar B_{c2} , superkonduktor kembali ke keadaan normal [2].

Rapat arus kritis (J_c) bukan sifat intrinsik superkonduktor dan J_c sangat bergantung pada struktur mikronya. Oleh karena itu, pengontrolan struktur mikro sangat penting dalam preparasi superkonduktor oksida (HTS) agar memiliki J_c tinggi. Penyebab rendahnya J_c di dalam HTS adalah karena lemahnya *link* antara batas-batas butir kristal dan tidak adanya pusat-pusat jepitan yang berfungsi sebagai penghambat pergerakan vorteks.

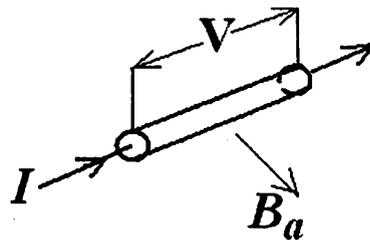
Khusus untuk superkonduktor sistem YBCO, yang adalah superkonduktor tipe-II, proses pelelehan ternyata selain cukup efektif dalam memperkuat *link* antara batas-batas butir melalui pengorientasian butir-butir kristalnya, juga dapat menyebabkan terbentuknya partikel-partikel fasa-211 yang terdispersi secara merata di dalam matriks YBCO. Partikel-partikel fasa-211 inilah yang berperan sebagai pusat-pusat jepitan bagi vorteks [2].

2. Flux Flow

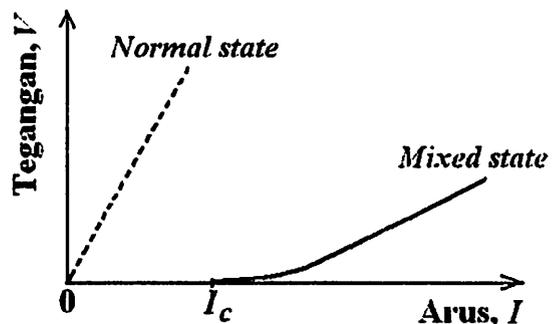
Misalkan ada sepotong kawat superkonduktor tipe-II diletakkan di dalam lingkungan medan magnet luar B_a , dimana $B_{c1} < B_a < B_{c2}$. Kawat superkonduktor tersebut kemudian dialiri arus I yang besarnya terus dinaikan. Asalkan arus itu masih lebih kecil dari arus kritis I_c , maka pada kedua ujung kawat tidak akan ada beda tegangan, atau dengan kata lain : tidak ada *flux flow*. Namun ketika arus I dinaikan hingga lebih besar dari I_c , maka antara kedua ujung kawat akan teramati tegangan V (volt), yang besarnya berbanding lurus dengan besarnya arus I (Ampere) yang dialirkan dan memenuhi hukum Ohm : $V = I.R$, dimana R adalah resistansi (Ohm), muncul akibat adanya *flux flow* [17].

Besarnya arus kritis I_c bergantung pada kadar fasa impuritas di dalam kawat, lebih murni kawat, maka I_c akan lebih kecil.

Disamping itu, jika kawat tidak mengandung impuritas, maka akan terjadi fenomena *flux flow* yang tidak *ohmic* yang disebut *taff* (*thermally assisted flux flow*). *Taff* terjadi manakala arus yang dialirkan pada bahan sudah mendekati harga I_c dan pada bahan terjadi peningkatan suhu, maka fluktuasi suhu tadi menyebabkan vorteks bergerak akibat tidak ada penjepit vorteks [17].



Gambar 3. Sepotong kawat superkonduktor tipe-II, dialiri arus I di dalam lingkungan medan magnet $B_{c1} < B_a < B_{c2}$.



Gambar 4. Kurva tegangan, V terhadap arus, I pada superkonduktor tipe-II.

BAHAN DAN TATA KERJA

1. Preparasi Cuplikan

Dalam penelitian ini disiapkan cuplikan superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dengan metode reaksi padatan (*solid state reaction*), yakni suatu proses yang terdiri dari kegiatan penimbangan unsur penyusun : Y_2O_3 , $BaCO_3$ dan CuO yang masing-masing memiliki

kemurnian minimal 99,9 %, pencampuran, kalsinasi dan sintering [14]. Serbuk hasil proses kalsinasi, setelah digerus selama 1-2 jam, ditekan di dalam sebuah *die* dengan tekanan 6,5 ton selama minimal 60 detik. Dalam percobaan ini dibuat 10 buah pelet $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, masing-masing berat 5g, diameter $\phi = 2$ cm, tebal $t \approx 4$ mm. Pelet-pelet ini selanjutnya disebut cuplikan Fasa-123.

Fasa hijau Y_2BaCuO_5 (Fasa-211) disintesis dari bahan baku serbuk : Y_2O_3 , BaCO_3 dan CuO , masing-masing dengan kemurnian minimal 99,9 %. Bahan baku tersebut ditimbang berdasarkan perbandingan mol ion $\text{Y}:\text{Ba}:\text{Cu}=2:1:1$. Penimbangan dilakukan dengan neraca analitis hingga ketelitian tiga angka di belakang koma. Selanjutnya dilakukan pengadukan dengan cara menggerus di dalam *mortar agate* selama 5 jam. Kemudian dilakukan proses kalsinasi pada 900°C selama 6 jam dengan laju pemanasan dan pendinginan masing-masing $300^\circ\text{C}/\text{jam}$, maka diperoleh serbuk berwarna hijau gelap. Setelah digerus selama 1 jam, serbuk dihentuk menjadi sebuah pelet. Pelet Y_2BaCuO_5 dibuat dengan cara yang sama dengan pelet Fasa-123 di atas. Pelet tersebut disinter pada $1050^\circ\text{C}/10$ jam dengan laju pemanasan dan pendinginan masing-masing $60^\circ\text{C}/\text{jam}$. Pelet hasil proses sinter tersebut berwarna hijau dan selanjutnya disebut Fasa-211.

Pelet-pelet Fasa-123 dan Fasa-211 masing-masing digerus kembali sehingga diperoleh serbuk yang halus. Kemudian ke dalam Fasa-123 ditambahkan Fasa-211, sehingga diperoleh 5 buah campuran dengan perbandingan berat seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Kelima campuran Fasa-123 dan Fasa-211 selanjutnya disebut cuplikan YBCO-M0, YBCO-M1, YBCO-M2, YBCO-M3 dan YBCO-M4. Setiap campuran digerus selama 1 jam, kemudian kelima campuran tersebut masing-masing dicetak kembali menjadi pelet

dengan cara yang sama seperti sebelumnya. Setiap campuran terdiri dari 2 pelet dengan berat masing-masing 4 g.

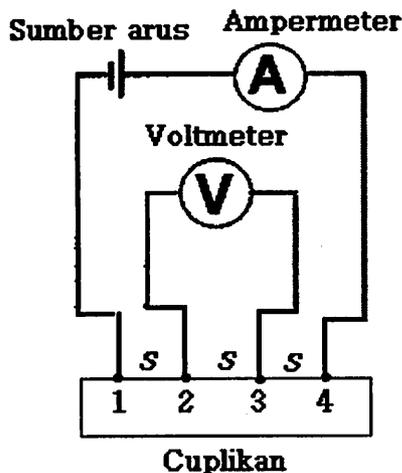
Kelima cuplikan kemudian dilelehkan mengikuti diagram perlakuan panas seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Tampak pada gambar tersebut, cuplikan dipanaskan menuju 1100°C dengan laju $400^\circ\text{C}/\text{jam}$ (A-B), ditahan pada suhu itu selama 0,2 jam (B-C) [1]. Cuplikan kemudian didinginkan ke 1000°C dengan laju $400^\circ\text{C}/\text{jam}$ (C-D). Selanjutnya didinginkan secara lambat ke 900°C , laju $20^\circ\text{C}/\text{jam}$ (D-E) dan kemudian didinginkan hingga suhu ruang, laju $60^\circ\text{C}/\text{jam}$ (E-F) dalam lingkungan udara.

2. Karakterisasi Cuplikan

Karakterisasi cuplikan meliputi sifat listrik dan struktur kristal cuplikan, kedua besaran tadi berturut-turut dievaluasi dengan memakai *probe* empat titik (PET) dan difraktometer sinar-x (XRD). Sifat listrik bahan diamati, pertama dengan mengukur besaran resistansi sebagai fungsi suhu dan kedua, dengan mengukur tegangan sebagai fungsi arus. Dari pengukuran yang pertama diperoleh besaran suhu transisi kritis bahan, T_c . Sedangkan dari pengukuran kedua diperoleh rapat arus kritis bahan, J_c . Skema PET ditunjukkan pada Gambar 5. Pada diagram ini, empat kabel (*probe*) disentuhkan pada permukaan cuplikan.

T_c diukur dengan mengalirkan arus listrik yang konstan di sepanjang (permukaan) cuplikan melalui *probe*-1 dan 4 (lihat Gambar 5). Arus listrik yang konstan diperoleh dari sebuah sumber arus atau penyedia daya seperti ditunjukkan. Jika cuplikan memiliki resistansi terhadap aliran arus listrik, maka akan ada penurunan tegangan ketika arus mengalir sepanjang cuplikan tersebut. Misalkan, antara ujung kabel (*probe*) yang berkode 2 dan 3 terdapat perbedaan tegangan sebesar V_{23} . Maka

resistansi cuplikan antara *probe-2* dan 3 bisa dihitung, asalkan tegangan V_{23} dapat diukur. Tegangan diukur dengan menggunakan sebuah voltmeter digital. Jadi, resistansi cuplikan antara *probe-2* dan 3, $R_{23} = V_{23}/I_{14}$, dimana I_{14} = arus yang keluar dari penyedia daya, harganya tetap. Arus yang mengalir melalui rangkaian *probe-2*, voltmeter, dan *probe-3* dapat diabaikan karena impedansi voltmeter sangat tinggi. Jadi, karena tidak ada penurunan tegangan pada rangkaian *probe-2*, voltmeter, dan *probe-3*, resistansi R_{23} yang diukur benar-benar resistansi superkonduktor antara *probe-2* dan *probe-3*.



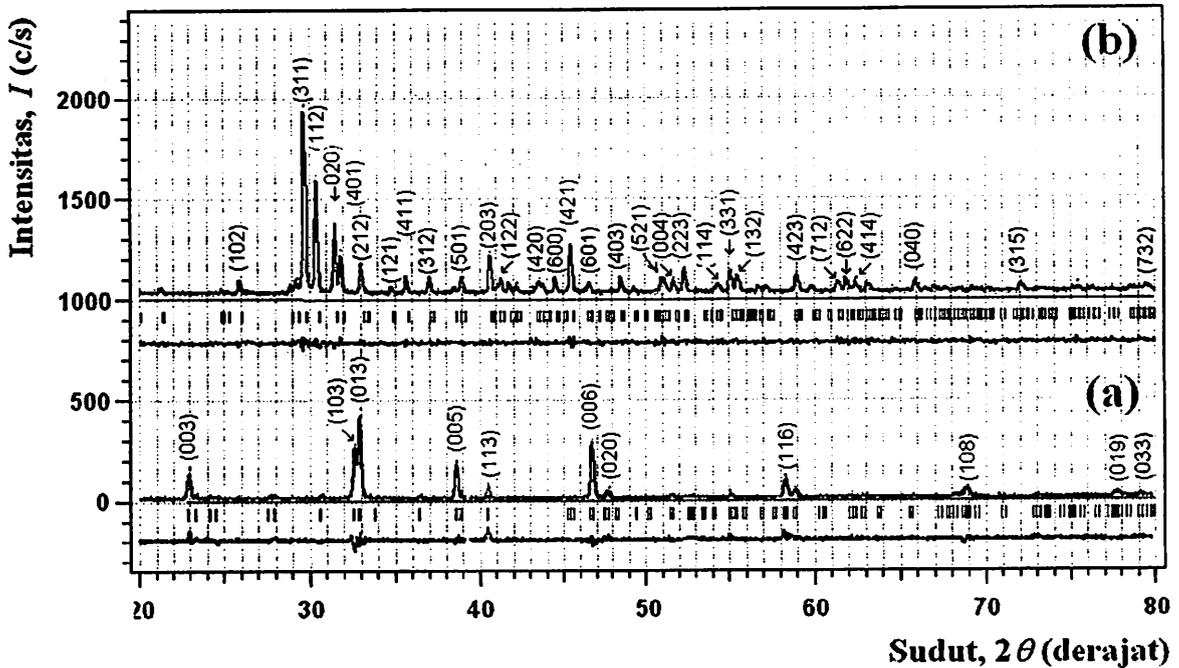
Gambar 5. *Probe* Empat Titik.

J_c superkonduktor diukur dengan cara membenamkan cuplikan di dalam nitrogen cair, kemudian I_{14} dinaikan secara bertahap mulai dari nol Amper. Karena bahan bersifat superkonduktor, V_{23} tetap menunjukkan angka nol Volt walaupun I_{14} terus diperbesar. Namun pada harga I_{14} tertentu, bahan mengalami transisi dari keadaan superkonduktor ke keadaan normal, ditandai dengan mulai teramatinya tegangan pada Voltmeter ($V_{23} > 0$ volt). Arus pada saat terjadi transisi adalah arus kritis, I_c .

Pola difraksi sinar-X diukur menggunakan XRD-Philip, Jenis : PW1710, Target : Cu, $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$, arus $I = 20 \text{ mA}$ dan tegangan $V = 30 \text{ kV}$, daerah pengukuran 2θ : 20° - 80° , lebar langkah : $0,02^\circ$ dan *preset-time* : 0,05 detik. Data intensitas terhadap sudut difraksi dianalisis dengan metode Rietveld [18].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis kualitatif dengan metode Rietveld pada Fasa-123 dan Fasa-211 ditunjukkan pada Gambar 6. Analisis dilakukan dengan asumsi bahwa di dalam cuplikan masing-masing hanya ada Fasa-123 dan Fasa-211. Tampak pada gambar tersebut bahwa profil pola difraksi hasil kalkulasi (garis malar) berimpit dengan profil data observasi (garis titik-titik). Kualitas *fitting* dapat dilihat pada profil selisih harga intensitas hasil pengamatan dan hasil kalkulasi, dimana deviasi intensitas terhadap sudut 2θ , relatif kecil baik untuk Fasa-123 (Gambar 6a) maupun untuk Fasa-211 (Gambar 6b). Hal ini berarti bahwa parameter *fitting* baik di dalam cuplikan Fasa-123, maupun cuplikan Fasa-211 sesuai dengan asumsi, yakni parameter-parameter fasa tunggal, artinya tidak ada fasa lain di dalam masing-masing cuplikan. Fasa-123 memiliki sistem kristal : ortorombik, grup ruang : Pmmm, Vol. I, No. 47; parameter kisi: $a = 3,888(1) \text{ \AA}$, $b = 3,823(1) \text{ \AA}$, $c = 11,685(3) \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ dan faktor $S = 1,22$. Fasa-211 memiliki sistem kristal : ortorombik, grup ruang : Pnma, Vol. I, No. 62; parameter kisi: $a = 12,167(2) \text{ \AA}$, $b = 5,654(1) \text{ \AA}$, $c = 7,125(1) \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ dan faktor $S = 1,04$. Kualitas *fitting* (*goodness of fitting*) juga dapat dilihat dari harga faktor S , dimana nilai standar Rietveld adalah $S_{st} = 1,30$ [18], semakin kecil harga faktor S semakin baik kualitas *fitting*. Tampak bahwa kedua profil pola difraksi Gambar 6a dan 6b memiliki faktor S yang kecil, bahkan lebih kecil dari harga S_{st} .



Gambar 6. Profil pola difraksi hasil analisis dengan metode Rietveld pada data difraksi sinar-X dari cuplikan : (a). Fasa-123 dan (b). Fasa-211

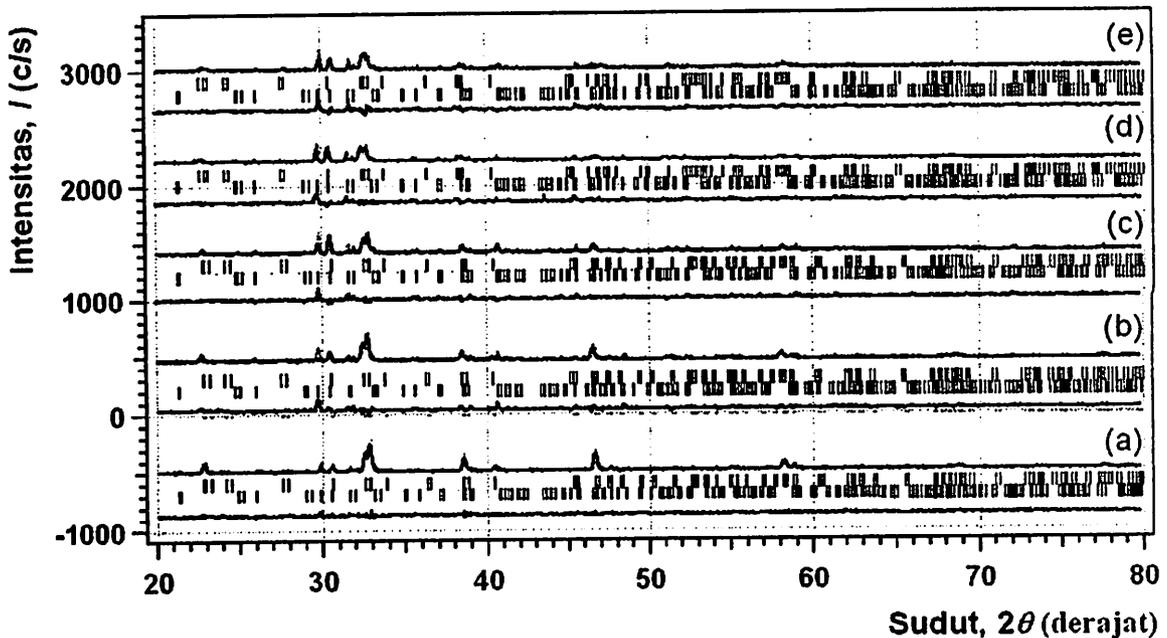
Tabel 1. Fraksi massa Fasa-211 di dalam matriks Fasa-123 dan faktor S.

Cuplikan YBCO-	Fasa-211 (% berat)		Faktor S
	Metoda Rietveld	Metoda Langsung	
M0	27	22	1,16
M1	45	34	1,26
M2	59	51	1,36
M3	54	52	1,57
M4	53	53	1,43

Gambar 7 adalah profil pola difraksi hasil analisis dengan metode Rietveld pada cuplikan YBCO-M0 (a), YBCO-M1 (b), YBCO-M2 (c), YBCO-M3 (d) dan YBCO-M4 (e). Kelima jenis cuplikan masing-masing terdiri dari Fasa-123 dan Fasa-211. Sederet garis-garis pendek vertikal adalah posisi puncak-puncak Bragg, masing-masing untuk Fasa-123 (deretan bagian atas) dan Fasa-211 (deretan bagian bawah). Profil yang menggambarkan kualitas *fitting* ada

di bawah deretan garis-garis pendek vertikal, baik pada Gambar 7(a), 7(b), 7(c), 7(d), maupun Gambar 7(e).

Tampak pada gambar tersebut bahwa intensitas puncak tertinggi Fasa-211 hasil kalkulasi (garis malar), yakni puncak (311) pada $2\theta \approx 29,85^\circ$, lebih rendah dari intensitas observasi (garis titik-titik) baik pada YBCO-M0, YBCO-M1, YBCO-M2, YBCO-M3 maupun YBCO-M4. Hal ini diperlihatkan lebih jelas pada Gambar 8 untuk cuplikan YBCO-M0. Sehingga berdasarkan metode Rietveld, puncak tertinggi Fasa-211 bukan lagi puncak (311) melainkan puncak (112) pada $2\theta \approx 30,51^\circ$. Hal ini terjadi karena faktor koreksi : orientasi *preferred* khususnya untuk Fasa-211 masih belum akurat. Oleh karena itu kuantitas Fasa-211 di dalam matriks Fasa-123 hasil analisis dengan metode Rietveld perlu dikonfirmasi dengan metode lain, dalam hal ini digunakan metode langsung (*direct method*) [19]. Kuantitas Fasa-211 (C_u) dan kuantitas

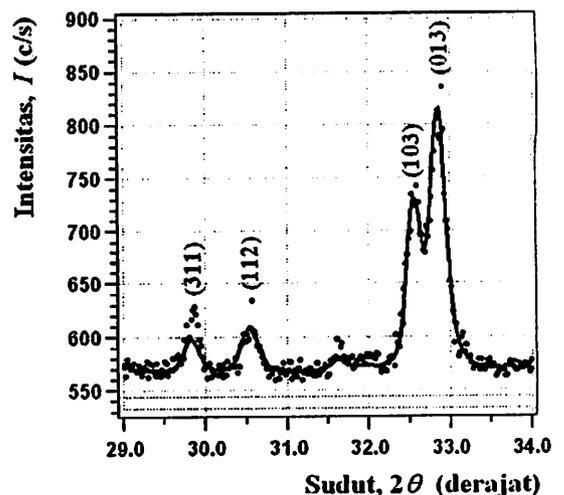


Gambar 7. Profil pola difraksi hasil analisis dengan metode Rietveld pada data difraksi sinar-X dari cuplikan : YBCO-M0 (a), YBCO-M1 (b), YBCO-M2 (c), YBCO-M3 (d) dan YBCO-M4 (e).

Fasa-123 (C_β) di dalam matriks Fasa-123 ditentukan secara langsung dengan membandingkan intensitas puncak tertinggi kedua fasa tersebut, yakni : $I_\alpha / I_\beta \sim C_\alpha / C_\beta$ dan $C_\alpha + C_\beta = 1$. Data fraksi massa Fasa-211 di dalam matriks Fasa-123 dan faktor S ditunjukkan pada Tabel 1.

Tampak bahwa di dalam cuplikan YBCO-M0 terdapat lebih dari 20 % fraksi massa Fasa-211, padahal bahan baku cuplikan tersebut adalah murni Fasa-123 dan pada awal proses pelelehan Fasa-211 tidak ditambahkan ke dalam matriks Fasa-123. Data ini mengkonfirmasi hasil penelitian terdahulu [15,16] bahwa ketika Fasa-123 di bakar di dalam tungku pada 1100°C selama beberapa menit (sekitar 12 menit), sebagian Fasa-123 ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$) terurai menjadi Fasa-211 (Y_2BaCuO_5) dan fasa cair $L(3BaCuO_2+2CuO)$. Cuplikan kemudian didinginkan secara cepat ke 1000°C. Pada suhu sekitar 1000°C, idealnya semua Fasa-211 bereaksi kembali dengan fasa

cair L membentuk matriks Fasa-123 sesuai dengan reaksi kimia : $Y_2BaCuO_5 + L(3BaCuO_2+2CuO) \rightarrow 2YBa_2Cu_3O_x$.



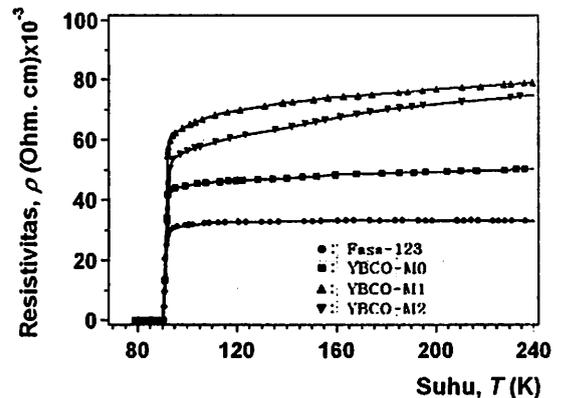
Gambar 8. Profil pola difraksi sinar-X hasil observasi (titik-titik) dan kalkulasi (garis malar) dari cuplikan YBCO-M0.

Namun karena sebagian fasa cair L mengendap pada *crucible*, maka sebagian Fasa-211 tidak memiliki padanan reaksi dan akhirnya terjebak di dalam matriks Fasa-123. Dalam eksperimen ini lebih dari 20 % fraksi massa Fasa-211 yang terperangkap di dalam fasa matriks. Kuantitas Fasa-211 pada YBCO-M1, YBCO-M2, YBCO-M3 dan YBCO-M4 adalah akumulasi dari Fasa-211 yang ditambahkan pada awal proses dan Fasa-211 yang terbentuk pada saat proses pemanasan. Oleh karena itu, fraksi massa Fasa-211 di dalam keempat jenis cuplikan yang disebut terakhir lebih besar dari pada di dalam YBCO-M0. Tampak pada Tabel 1 bahwa fraksi massa Fasa-211 di dalam matriks Fasa-123 meningkat tajam hingga penambahan 10 % berat Fasa-211 dan selanjutnya menunjukkan kejenuhan.

Superkonduktor selain memiliki resistivitas $\rho = 0 \Omega \cdot \text{cm}$, juga dapat menolak medan magnet. Fenomena ini biasa disebut efek Meissner. Efek Meissner bukan konsekuensi dari adanya $\rho = 0 \Omega \cdot \text{cm}$, melainkan sifat intrinsik atau ciri khas keadaan superkonduktor. Cara yang paling mudah untuk mengetahui apakah bahan bersifat superkonduktif adalah dengan uji efek Meissner. Hasil uji efek Meissner menunjukkan bahwa pelet Fasa-123, YBCO-M0, YBCO-M1 dan YBCO-M2 melayang di atas magnet permanent SmCo, ini berarti cuplikan-cuplikan tersebut adalah superkonduktor. Sedangkan cuplikan Fasa-211, YBCO-M3 dan YBCO-M4 tidak menampilkan adanya efek Meissner. Jadi ketiga jenis cuplikan yang disebut terakhir adalah bahan non superkonduktor. Oleh karena itu, pengukuran sifat listrik hanya dilakukan pada keempat jenis cuplikan yang disebut pertama.

Hubungan antara resistivitas $\rho(\Omega \cdot \text{cm})$ terhadap suhu $T(\text{K})$ pada Fasa-123, YBCO-M0, YBCO-M1 dan YBCO-M2 ditunjukkan pada Gambar 9. Tampak pada gambar tersebut bahwa $\rho(\Omega \cdot \text{cm})$ berkurang sejalan dengan

penurunan suhu dari suhu ruang sampai dijumpai fenomena superkonduktivitas, yakni terjadinya penurunan harga resistivitas mendadak menuju $\rho \approx 0 \Omega \cdot \text{cm}$ pada $T = T_c$. Keempat jenis cuplikan memiliki suhu transisi kritis $T_c \approx 90 \text{ K}$. Data ini mengkonfirmasi bahwa suhu transisi kritis adalah besaran intrinsik fasa superkonduktor, tidak dipengaruhi oleh rekayasa struktur mikro atau komposisi cuplikan. Namun demikian pada $T > T_c$, keempat jenis cuplikan memiliki $\rho(\Omega \cdot \text{cm})$ berbeda-beda, data ditunjukkan pada pada Tabel 2. Hal ini berarti bahwa resistivitas adalah besaran ekstrinsik, bergantung pada struktur mikro bahan.



Gambar 9. Grafik hubungan antara resistivitas ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$) terhadap suhu T (K)

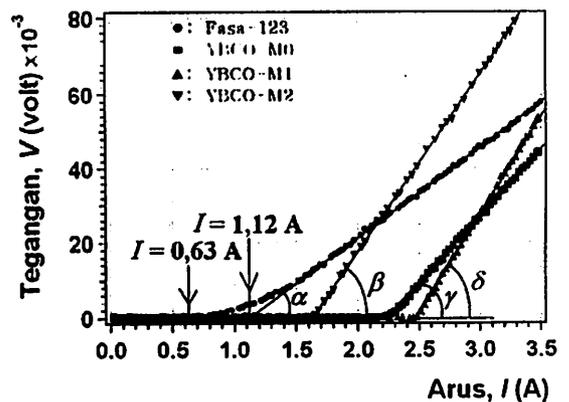
Kenapa pada keadaan superkonduksi, $\rho \approx 0 \Omega \cdot \text{cm}$? Ketika superkonduktor didinginkan hingga suhu $T < T_c$, maka gas elektron-elektron individual yang saling tolak-menolak itu mentransformasikan dirinya sedemikian sehingga elektron-elektron tersebut menjadi berpasangan-pasangan. Dengan kata lain, elektron-pertama dengan momentum dan spin tertentu terkopel lemah dengan elektron-kedua yang memiliki momentum dan spin berlawanan. Pasangan-pasangan ini disebut pasangan Cooper. Perikat kedua elektron sehingga bisa berpasangan adalah gelombang

elastik kisi yang disebut fonon. Jadi, elektron-elektron yang membentuk pasangan memiliki momentum total nol. Dari relasi de Broglie : $p = 2\pi h \cdot \lambda^{-1}$, dimana p , h dan λ berturut-turut adalah momentum, konstanta Planck dan panjang gelombang, jelas bahwa manakala $p = 0$, maka panjang gelombang λ menjadi tidak berhingga. Dalam optika, suatu gelombang akan dihamburkan hanya jika jarak antara pusat-pusat penghambur di dalam suatu volume setara dengan panjang gelombangnya. Jelaslah bahwa dalam kasus superkonduktor peristiwa hamburan elektron-elektron tersebut tidak akan terjadi. Oleh karena itu pasangan-pasangan Cooper tidak dapat dihamburkan oleh penghambur-penghambur berupa elektron-elektron individual, sehingga $\rho = 0 \Omega \cdot \text{cm}$.

Dari persamaan : $\rho = 2\pi s (V/I)$, dimana s = jarak antar probe, $V = V_{23}$ dan $I = I_{14}$ (Gambar 5), tampak bahwa jika $\rho \approx 0 \Omega \cdot \text{cm}$, maka $V = 0$ volt [20]. Artinya pada keadaan superkonduksi, tidak ada tegangan di dalam cuplikan. Jadi, arus listrik mengalir bukan karena ada beda tegangan. Arus yang demikian disebut arus super. Fenomena superkonduksi ini diformulasikan dengan persamaan London : $E = 4\pi\lambda^2 (\delta J_s / \delta t)$, dimana E = medan listrik, J_s = kerapatan arus superkonduksi, t = waktu dan λ = *characteristic length* [2]. Tampak dari persamaan London di atas, bahwa jika $E = 0$ atau $V = 0$ maka J_s harganya tetap tidak berubah terhadap waktu. Jadi arus super tetap dapat mengalir tanpa ada beda tegangan. Fenomena arus super ini dapat dilihat juga dari data pengukuran tegangan, V (volt) terhadap arus, I (A) ditunjukkan pada Gambar 10. Tampak bahwa walaupun arus I dinaikan dari 0 hingga $I = I_c$, namun tegangan V masih tetap, 0 volt (dalam penelitian ini digunakan kriteria tegangan 0,0001 volt sebagai titik nol voltmeter). Data arus kritis I_c ditunjukkan pada Tabel 2. Tegangan listrik baru teramati pada $I > I_c$ dan rapat arus kritis J_c dihitung menggunakan rumus : $J_c = I_c / (\pi s^2)$ [20], hasilnya ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Resistivitas ρ ($\times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$), resistansi R ($\times 10^{-3} \Omega$), arus kritis I_c (A) dan rapat arus kritis J_c ($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$).

Besaran	Cuplikan YBCO-			
	Fasa-123	M0	M1	M2
I_c	0,6	2,2	2,4	1,6
J_c	5	17	20	13
R	2,57	3,65	5,34	4,72
ρ	3,20	4,72	6,92	6,55



Gambar 10. Grafik hubungan antara tegangan, V (volt) terhadap arus, I (A).

Tampak pada Gambar 10, pada awalnya tegangan tetap nol walaupun arus telah dialirkan dan harganya terus ditingkatkan. Ketika arus yang dialirkan pada Fasa-123 mencapai harga $I = 0,63$ A, maka tercipta *flux flow* yang tidak *ohmic*. Keadaan *flux flow* yang tidak *ohmic* ini terus berlangsung hingga $I \approx 1,5$ A dan hukum Ohm baru dipenuhi pada $I > 1,5$ A. Titik potong garis ekstrapolasi yang *ohmic* dengan sumbu I adalah pada ordinat $I = 1,12$ A. Jadi dalam keadaan ideal, *flux flow* akan dimulai ketika arus telah mencapai harga 1,12 A bukan 0,63 A. Fenomena ini disebut TAFF (*thermally activated flux flow*). Seperti telah dijelaskan di atas, TAFF terjadi karena

ketika arus dinaikan, maka suhu cuplikan bertambah. Akibat bertambahnya suhu, vortek mendapat tambahan energi, sehingga vorteks serta merta bergerak dan oleh karenanya muncul resistivitas, yakni resistivitas yang tidak *ohmic* tadi.

Misalkan F_p adalah gaya jepitan vorteks per satuan volume, maka jika $F < F_p$, maka vorteks tidak akan bergerak walaupun vorteks mendapat tambahan energi termal, sehingga arus yang dialirkan non-disipatif ($\rho \approx 0 \Omega \cdot \text{cm}$). Tetapi, jika $F > F_p$, maka vorteks akan bergerak dan tercipta *flux flow* ($\rho > 0 \Omega \cdot \text{cm}$). Dan jika $F = F_p$, maka terbentuk keadaan kritis dan berlaku hubungan : $F_p = J_c B$. Jelaslah bahwa untuk $J < J_c$, tidak akan ada pergerakan vorteks atau *flux flow* atau disipasi energi. *Flux flow* baru terjadi jika $J > J_c$. Fenomena ini terjadi pada YBCO-M0, YBCO-M1 dan YBCO-M2, yakni Fasa-123 yang mengandung inklusi Fasa-211.

Tampak pada Gambar 10, kurva disipasi energi (*flux flow*) keempat cuplikan mengikuti hukum Ohm : $V = I.R$, dimana V , I dan R berturut-turut adalah tegangan (volt), arus (Amper) dan resistansi (Ohm). R adalah koefisien arah garis V - I linear dengan sudut kemiringan : $\alpha = 1,5^\circ$; $\beta = 2,1^\circ$; $\gamma = 2,7^\circ$ dan $\delta = 3,1^\circ$ berturut-turut untuk cuplikan Fasa-123, YBCO-M0, YBCO-M1 dan YBCO-M2. Dari data-data tersebut diperoleh harga R dan dari hubungan $\rho = 2\pi s.R$ diperoleh ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$), data lengkap ditunjukkan pada Tabel 2.

KESIMPULAN

Kehadiran Fasa-211 di dalam superkonduktor YBCO berpengaruh terhadap peningkatan rapat arus kritis J_c bahan superkonduktor tersebut; dimana J_c tertinggi diperoleh pada matriks Fasa-123 yang memiliki kandungan Fasa-211 sekitar 35 % berat. Kehadiran Fasa-211 di dalam superkonduktor YBCO juga berpengaruh terhadap fenomena

TAFF (*thermally activated flux flow*), dimana dengan adanya Fasa-211, maka fenomena *flux flow* yang tidak *ohmic* tidak terjadi pada matriks Fasa-123.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih disampaikan kepada semua pihak yang terkait dengan kegiatan penelitian ini, terutama Bapak Drs. Sumanto (Ka Bag TU, PBIN) beserta staf, Bapak Dr. Ridwan dan Bapak Drs. Gunandjar, SU.

DAFTAR PUSTAKA

1. M. Murakami, *Supercond. Sci. Technol.* 5, (1992) 185-203.
2. M. Cyrot and D. Pavuna, *Introduction to Superconductivity and High-Tc Materials*, World Scientific, Singapore, New Jersey, London, Hongkong, 1992, p. 75.
3. D. Muller and H. C. Freyhardt, *Physica C* 242, (1995) 283-290.
4. R. Gopalan, T. Roy, T. Rajasekharan, G. Rangarajan, N. Hari Babu, *Physica C* 244, (1995) 106-114.
5. Yi Song, James R. Gaines, *Physica C* 253, (1995) 177-181.
6. S. Kohayashi, S. Yoshizawa, N. Hirano, S. Nagaya, H. Kojima, *Physica C* 254, (1995) 249-257.
7. C. H. Choi, Y. Zhao, C. C. Sorrell, M. La Robina and C. Andrikidis, *Phys. Stat. Sol.* 156, (1996) 175-185.
8. M. Mironova, G. Du, I. Rusakova, K. Salama, *Physica C* 271, (1996) 15-22.
9. H. Teshima, M. Tanaka, K. Miyamoto, K. Nohguchi, K. Hinatta, *Physica C* 256, (1996) 142-148.

10. P. Diko, H. Kojo, M. Murakami, *Physica C* **276**, (1997) 185-196.
11. G. Kozlowski, C. Varanasi, I. Maartense, C. E. Oberly, *Physica C* **276**, (1997) 197-201.
12. Lian Zhou, *Physica C* **337**, (2000) 121-129.
13. X. W. Zou, Z. H. Wang, H. Zhang, *Physica C* **356**, (2001) 39-45.
14. E. Sukirman, W. Ari Adi, Salmah, *Majalah BATAN*, Vol. **XXXIII**, No. 1/2, (2000) 31-45.
15. E. Sukirman, W. Ari Adi, D. S. Winatapura dan Yustinus, *Proses Pelelehan $YBa_2Cu_3O_{7-x}$* , Prosiding Pertemuan Ilmiah IPTEK Bahan'04, Kawasan PUSPIPTEK Serpong, 7 September 2004, h. 233-240.
16. D. S. Winatapura, W. Ari Adi dan E. Sukirman, *Prosiding Pertemuan Ilmiah Iptek Bahan'04*, Puslitbang Iptek Bahan, BATAN, Kawasan Puspiptek, Serpong, 7 Sept. 2004, h. 287-292.
17. A.C. Rose-Innes and E.H. Rhoderick, *Introduction to Superconductivity*, Pergamon Press, Oxford-London, 1969, p. 192.
18. F. Izumi, *Rigaku J.* **6**, (1089) 10.
19. B. D. Cullity, *Element of X-rays Diffraction*, Addison Wesley, 1978.
20. W. Ari Adi, E. Sukirman, D. S. Winatapura, G. Tj. Sulungbudi, *Majalah BATAN*, Vol. **XXXIV**, No.1/2, (2001) 15-30.