

Analisis data pengaruh orientasi medan magnet terhadap rapat arus kritis pita superkonduktor BSCCO/Ag

Beliarova Franciska Hidayat, Markus Diantoro*, Abdulloh Fuad

Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang No. 5 Malang, Jawa Timur, Indonesia

*Penulis korespondensi, Surel: markus.diantoro.fmipa@um.ac.id

Paper received: Paper received: 01-01-2022; revised: 15-01-2022; accepted: 31-01-2022

Abstrak

Orientasi medan magnet luar yang dikenakan pada pita superkonduktor dapat mempengaruhi nilai rapat arus kritis. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh orientasi medan magnet terhadap rapat arus kritis pita superkonduktor BSCCO-2223/Ag, BSCCO-2223/Ag didoping SrCo₃ 10%, dan BSCCO-2223/Ag didoping BaZrO₃ 10%. Penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai referensi untuk rujukan tentang pengaruh orientasi medan magnet terhadap rapat arus kritis pita superkonduktor. Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari pengukuran nilai arus I dan tegangan V menggunakan 4-probe pada medan magnet luar $H = 0,1$ T dan $0,5$ T, suhu 77 K serta sudut orientasi medan magnet dari 0° - 90° yang dilakukan di laboratorium IEE-SAV Bratislava Slovakia. Penelitian ini menganalisis data pengaruh orientasi medan magnet terhadap rapat arus kritis pita superkonduktor BSCCO-2223/Ag, BSCCO-2223/Ag didoping SrCo₃ 10%, dan BSCCO-2223/Ag didoping BaZrO₃ 10%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai rapat arus kritis J_c meningkat secara eksponensial seiring pemberian sudut orientasi medan magnet dari 0° sampai 90° . Hal ini dikarenakan pemberian sudut orientasi dari 0° sampai 90° mengakibatkan nilai medan magnet B semakin berkurang, maka gaya pinning vorteks semakin besar sehingga rapat arus kritis J_c juga semakin besar karena nilai medan magnet B berbanding terbalik dengan rapat arus kritis J_c . Sesuai dengan persamaan gaya pinning $\vec{F} = \vec{J}_c \times \vec{B}$.

Kata kunci: : orientasi medan magnet; rapat arus kritis; pita superkonduktor

1. Pendahuluan

BSCCO-2223 merupakan superkonduktor temperatur tinggi yang sangat menarik dikaji dari sisi ilmiah, karena memiliki temperatur kritis T_c yang tinggi, medan magnet kritis B_c yang tinggi dan strukturnya berlapis.

Beberapa jenis superkonduktor telah berhasil dibuat, dalam bentuk film, bulk, kabel, dan pita (Hassenzahl, 2004). Khusus untuk pita superkonduktor telah berhasil difabrikasi dengan menggunakan metode *Powder In Tube* (PIT) (Musenich, 2000 dan Maulana, 2001). Aplikasi utama pita superkonduktor, yaitu untuk transmisi daya listrik, motor stepper (Penrose, 2007) dan koil magnet (Godeke, 2006).

Sejauh ini telah banyak penelitian yang dilakukan untuk menguji karakteristik pita superkonduktor. Usak pada tahun 2003 telah melakukan pengukuran arus-tegangan (I - V) pita superkonduktor BSCCO-2223/Ag pada temperatur 77 K. Pada tahun yang sama D Zola melakukan pengukuran suseptibilitas pada pita superkonduktor BSCCO(2223)/Ag menggunakan amplifier dengan rentang frekuensi $1,0$ Hz sampai 70 Hz pada temperatur 77 K dan medan $1,5$ mT. Pada tahun 2006, Z Han mengukur perubahan nilai resistivitas terhadap temperatur pada berbagai pola pita superkonduktor BSCCO-Ag. Pengukuran rapat arus kritis pita superkonduktor Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x sebagai fungsi medan magnet telah dilakukan, dengan variasi temperatur 10 K, 30 K, dan 50 K, medan magnet tegak lurus sumbu-ab pada pita (Eck, 2008).

Untuk aplikasi pembuatan coil, pita superkonduktor harus dibuat melengkung berbentuk lilitan sehingga jika ada medan magnet luar yang dikenakan pada pita tidak selalu tegak lurus terhadap permukaan pita. Perbedaan sudut orientasi ini mengakibatkan perbedaan pengaruh medan terhadap rapat arus kritisnya. Pengetahuan karakteristik dari orientasi medan magnet terhadap rapat arus kritis pita superkonduktor sangat penting dari segi ilmiah. Berdasarkan hal tersebut, perlu diteliti “pengaruh orientasi medan magnet terhadap rapat arus kritis pita superkonduktor BSCCO-2223/Ag”.

Tujuan dan manfaat penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh besarnya medan magnet dan sudut orientasi medan magnet terhadap rapat arus kritis pita superkonduktor BSCCO-2223/Ag, BSCCO-2223/Ag didoping SrCO₃ 10%, dan BSCCO-2223/Ag didoping BaZrO₃ 10%. Penelitian ini diharapkan dapat menambah pengetahuan dan referensi untuk rujukan tentang pengaruh orientasi medan magnet terhadap rapat arus kritis pita superkonduktor BSCCO-2223/Ag, BSCCO-2223/Ag yang didoping dengan SrCO₃ 10%, dan BSCCO-2223/Ag yang didoping dengan BaZrO₃ 10%.

Kajian pustaka

Fenomena Superkonduktor

Dua fenomena utama dalam bahan superkonduktor, yaitu terjadinya hambatan listrik nol pada bahan dan penolakan medan magnet luar oleh bahan pada temperatur lebih kecil dari temperatur kritis ($T < T_c$) (Cyrot, 1992).

Hambatan Nol

Pada temperatur lebih rendah dari temperatur kritis $T < T_c$, masing-masing elektron “bebas” yang awalnya bersifat dalam keadaan normal terkondensasi, yaitu bersifat seperti zat cair. Jarak antar elektron semakin dekat, sistem berkondensasi dan membentuk pasangan elektron, yang disebut Cooper. Pasangan Cooper terbentuk dalam keadaan superkonduktif yang disebut juga sebagai super elektron. Dalam keadaan tersebut resistivitas bernilai nol, sehingga arus mengalir tanpa adanya hambatan (Cyrot, 1992).

Efek Meissner

Pada temperatur lebih tinggi dari temperatur kritis ($T > T_c$) medan magnet menembus bahan, pada temperatur lebih rendah dari temperatur kritis ($T < T_c$) medan magnet ditolak sepenuhnya oleh bahan (Bourdillon, 1993). Efek meissner dapat diartikan sebagai suatu fenomena penolakan medan magnet luar oleh bahan superkonduktor.

Tipe Superkonduktor

Bahan superkonduktor bila dikenai medan magnet luar (H) akan terbedakan dalam dua kelompok, yaitu bahan bersifat sebagai superkonduktor tipe I dan superkonduktor tipe II. Apabila nilai parameter Ginzburg-Landau lebih kecil dari $1/\sqrt{2}$ ($\kappa < 0,7$ bahan termasuk superkonduktor tipe I, jika bahan memiliki parameter Ginzburg-Landau lebih besar dari $1/\sqrt{2}$ ($\kappa > 0,7$), maka bahan termasuk superkonduktor tipe II (Cyrot, 1992 dan Tinkham, 1996).

Superkonduktor Tipe I

Superkonduktor tipe I memiliki dua keadaan, yaitu keadaan meissner dan keadaan normal. Bahan superkonduktor pada tipe I menolak sepenuhnya fluks magnet pada medan magnet lebih kecil dari medan kritis ($B < B_c$), yang disebut keadaan meissner atau superkonduktif. Keadaan normal terjadi ketika medan magnet lebih besar dari medan kritis ($B > B_c$) (Cyrot, 1992).

Superkonduktor Tipe II

Superkonduktor tipe II memiliki tiga keadaan, yaitu keadaan meissner, campuran dan normal. Superkonduktor tipe II memiliki dua medan kritis, yaitu medan kritis B_{c1} dan medan kritis B_{c2} . Keadaan Meissner terjadi pada medan magnet lebih kecil dari medan kritis B_{c1} ($B < B_{c1}$). Pada rentang medan kritis B_{c1} sampai medan kritis B_{c2} disebut keadaan campuran ($B_{c1} < B < B_{c2}$). Bahan superkonduktor pada tipe II menjadi normal bila medan magnet lebih besar dari medan kritis B_{c2} ($B > B_{c2}$) seperti pada Gambar 2.8 (Cyrot, 1992).

Vorteks

Vorteks hanya terjadi pada superkonduktor tipe II, yaitu pada keadaan campuran dalam selang medan magnet kritis B_{c1} sampai B_{c2} ($B_{c1} < B < B_{c2}$). Cyrot (1992) memberikan pengertian vorteks sebagai fluks magnet yang berpenetrasi secara parsial pada superkonduktor dalam bentuk filamen-filamen kecil mikroskopik. Vorteks dapat diartikan sebagai fluks magnet terkuantisasi yang menembus bahan superkonduktor (Ulfaty, 2007). Dengan kata lain fluks dapat ditunjukkan sebagai filamen-filamen kecil dan panjang dimana fluks magnet terlokalisasi di dalamnya dan dilindungi oleh arus super di daerah sekitarnya yang bebas fluks sebagai daerah superkonduktif (Nurwantoro, 1988).

Pembuatan Pita Superkonduktor

Pembuatan pita superkonduktor menggunakan Powder In Tube (PIT). Serbuk superkonduktor dimasukkan ke dalam tabung (selubung), pada ujung tabung ditutup, selanjutnya pada tabung diberi tekanan yang diatur selama proses pengulungan, pita superkonduktor telah terbentuk (Bourdillon, 1993).

Struktur Kristal Sistem BSCCO

Dalam sistem Bi-Sr-Ca-Cu-O ada tiga fase yang bersifat superkonduktor, yaitu fase 2201 yang mempunyai temperatur kritis $T_c = 10$ K, fase 2212 mempunyai temperatur kritis $T_c = 80$ K, dan fase 2223 mempunyai suhu kritis $T_c = 110$ K. Transisi temperatur BSCCO diberikan pada Tabel 2.1 (Bourdillon, 1993). Pada struktur kristal sistem BSCCO yang berperan dalam gejala superkonduktif adalah lapisan Cu-O₂ (Taoufik, 2006). Fase 2201 hanya terdapat satu lapisan CuO₂, dua lapisan Sr-O yang merupakan isolator dan dua lapisan Bi-O. Dalam fase 2212, terdapat satu lapisan Ca, dua lapisan Cu-O₂, dua lapisan Si-O, dan dua lapisan Bi-O. Sedangkan untuk fase 2223 terdapat dua lapisan Ca, tiga lapisan Cu-O₂, dua lapisan Sr-O, dan lapisan Bi-O (Bourdillon, 1993).

Rapat Arus Kritis Superkonduktor

Apabila bahan superkonduktor dialiri arus listrik melebihi suatu nilai tertentu maka dapat mengakibatkan bahan tersebut kehilangan sifat superkonduktifnya, batasan rapat arus dimana sifat superkonduktif masih dapat ditunjukkan bahan disebut sebagai rapat arus kritis (J_c) (Kurnianto, 2010). Pada keadaan campuran, apabila bahan dialiri arus listrik tegak lurus dengan medan magnet maka vorteks mendapat gaya lorentz yang tegak lurus dengan medan magnet dan arus listrik. Untuk mempertahankan vorteks agar tetap berada pada posisi awal maka diperlukan gaya pinning vorteks yang besarnya sama dengan gaya lorentz. Gaya pinning yang diperlukan untuk meredam pergerakan vorteks diberikan oleh Persamaan $\vec{F}_p = \vec{J}_c \times \vec{B}$.

Pengukuran menggunakan metode 4-probe (Gambar 2.19) diperoleh nilai arus I menggunakan ampermeter dan nilai tegangan V menggunakan voltmeter. Hasil pengukuran menggunakan metode 4-probe berupa nilai arus I dan tegangan V dibuat kurva I - V yang digunakan untuk menentukan nilai arus kritis I_c . Nilai I_c ditentukan dengan menggunakan metode kelistrikan dari kurva I - V dengan standar medan listrik $E_c = 1\mu\text{V}/\text{cm}$. Nilai rapat arus kritis J_c diperoleh dari pembagian nilai I_c dengan luas penampang pada bahan, diberikan pada Persamaan $J_c = \frac{I_c(A)}{A(\text{cm}^2)}$ (Diantoro, 2001).

Pengaruh Medan Magnet Terhadap Rapat Arus Kritis

Besarnya nilai rapat arus kritis dipengaruhi oleh besarnya medan magnet dan sudut orientasi medan magnet yang dikenakan pada bahan. Penelitian yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh besarnya medan magnet terhadap rapat arus kritis pada pita superkonduktor BSCCO-2223/Ag (909A), BSCCO-2223/Ag didoping SrCO₃ 10% (918C), dan BSCCO-2223/Ag didoping BaZrO₃ 10% (916D) menunjukkan bahwa penambahan medan magnet mengakibatkan nilai J_c berkurang (Diantoro, 2001).

Nilai rapat arus kritis bertambah dan berkurang secara eksponensial seiring bertambah besarnya sudut orientasi medan magnet. Nilai rapat arus kritis maksimum pada sudut 90° dan 270° dan nilai minimum rapat arus kritis pada sudut 0°, 180° dan 360° (Bourdillon, 1993).

2. Metode

Rancangan Penelitian

Penelitian ini menganalisis data pengaruh orientasi medan magnet terhadap rapat arus kritis pita superkonduktor BSCCO-2223/Ag. Data hasil eksperimen dari laboratorium IEE-SAV Brastislava Slovakia berupa nilai arus I dan tegangan V yang ditinjau dari sudut orientasi medan magnet 0° sampai 90° (Diantoro, 2001). Data eksperimen diplot berupa kurva I - V menggunakan Software Program Microcal Origin 5.0. Kurva I - V digunakan untuk menentukan nilai arus kritis I_c dengan menggunakan karakteristik kurva I - V ($E_c = 1\mu\text{V}/\text{cm}$). Menentukan nilai rapat arus kritis J_c menggunakan persamaan $J_c = \frac{I_c(A)}{A(\text{cm}^2)}$. Hubungan rapat arus kritis J_c dengan sudut medan magnet θ dapat diplot berupa kurva J_c - θ .

Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah Komputer dan Software Program Microcal Origin 5.0. Bahan yang digunakan berupa data nilai arus I dan tegangan V pita

superkonduktor BSCCO/Ag, BSCCO/Ag didoping SrCO₃ 10%, dan BSCCO/Ag didoping BaZrO₃ 10%.

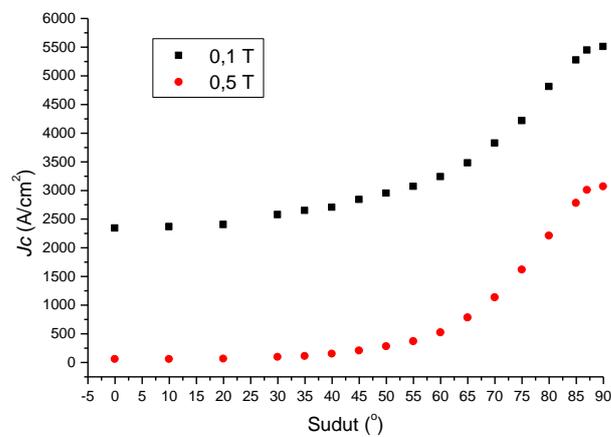
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Penelitian

Kurva J_c - θ BSCCO-2223/Ag

Nilai sudut θ dan nilai J_c BSCCO-2223/Ag hasil perhitungan untuk medan 0,1 T dan 0,5 T kemudian diplot menggunakan Program Microcal Origin 5.0 berupa kurva J_c - θ seperti pada Gambar 1.

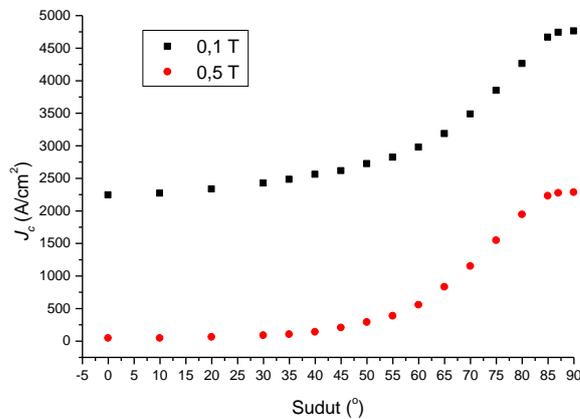
Gambar 1 Kurva J_c - θ BSCCO-2223/Ag pada medan 0,1 T dan 0,5 T



Kurva J_c - θ BSCCO-2223/Ag didoping SrCO₃ 10%

Nilai sudut θ dan nilai J_c BSCCO-2223/Ag didoping SrCO₃ 10% hasil perhitungan untuk medan 0,1 T dan 0,5 T kemudian diplot menggunakan Program Microcal Origin 5.0 berupa kurva J_c - θ seperti pada Gambar 2.

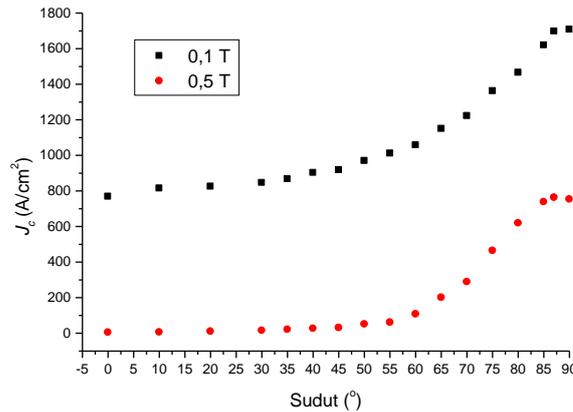
Gambar 2 Kurva J_c - θ BSCCO-2223/Ag didoping SrCO₃ 10% pada medan 0,1 T dan 0,5 T



Kurva J_c - θ BSCCO-2223/Ag didoping BaZrO₃ 10%

Nilai sudut θ dan nilai J_c BSCCO-2223/Ag didoping BaZrO₃ 10% hasil perhitungan untuk medan 0,1 T dan 0,5 T kemudian diplot menggunakan Program Microcal Origin 5.0 berupa kurva J_c - θ seperti pada Gambar 3.

Gambar 3 Kurva J_c - θ BSCCO-2223/Ag didoping BaZrO₃ 10% pada medan 0,1 T dan 0,5 T



Pembahasan

Kurva J_c - θ tampak bahwa pemberian sudut orientasi medan magnet dari 0°-90° mengakibatkan nilai rapat arus kritis J_c meningkat secara eksponensial. Hal ini disebabkan medan magnet berkurang seiring penigkatan sudut orientasi dari 0° sampai 90°, maka gaya pinning vorteks semakin besar sehingga rapat arus kritis J_c juga meningkat. Sesuai dengan persamaan gaya pinning $\vec{F}_p = \vec{J}_c \times \vec{B}$, dimana nilai medan magnet B berbanding terbalik dengan rapat arus kritis J_c .

Penambahan medan magnet 0,1 T ke 0,5 T menyebabkan nilai rapat arus kritis J_c menurun. Hal ini dikarenakan vorteks yang menembus bahan bertambah banyak bila medan magnet diperbesar, sehingga jarak antar vorteks semakin rapat maka superkonduktifitas menurun. Sehingga kemampuan meghantar arus menurun dan rapat arus kritis J_c juga mengecil. Dengan kata lain, gaya pinning bahan pada kondisi ini mengecil, menunjukkan persamaan gaya pinning $\vec{F}_p = \vec{J}_c \times \vec{B}$.

4. Simpulan

- 4.1. Pengaruh besarnya medan magnet terhadap rapat arus kritis menunjukkan penambahan medan magnet menyebabkan nilai rapat arus kritis J_c menurun. Hal ini dikarenakan vorteks yang menembus bahan bertambah banyak bila medan magnet diperbesar, sehingga jarak antar vorteks semakin rapat maka superkonduktifitas menurun. Sehingga kemampuan meghantar arus menurun dan rapat arus kritis J_c juga mengecil. Dengan kata lain, gaya pinning bahan pada kondisi ini mengecil, menunjukkan persamaan gaya pinning $\vec{F}_p = \vec{J}_c \times \vec{B}$
- 4.2. Pengaruh sudut orientasi medan magnet terhadap rapat arus kritis menunjukkan pemberian sudut orientasi medan magnet dari 0°-90° mengakibatkan nilai rapat arus

kritis J_c meningkat secara eksponensial. Hal ini disebabkan medan magnet berkurang seiring peningkatan sudut orientasi dari 0° sampai 90° , maka gaya pinning vorteks semakin besar sehingga rapat arus kritis J_c juga meningkat. Sesuai dengan persamaan gaya pinning $\vec{F}_p = \vec{J}_c \times \vec{B}$, dimana nilai medan magnet B berbanding terbalik dengan rapat arus kritis J_c .

Daftar Rujukan

- Bourdillon, A. (1994). *High temperature superconductors processing and science*, Engineering State University of New York: Department of Materials Sciences Academic press INC.
- Cyrot, Michael. (1992). *Introduction to superconductivity and High-Tc materials*. Singapore: World scientific publishing continental press.
- Diantoro, M., Tjia, M. O., Kováč, P., & Hušek, I. (2001). *Pinning mechanisms in Bi-2223 tapes with reinforced Ag sheath and oxide additives in the core*. *Physica C: Superconductivity*, 357, 1182-1185.
- Eck, H, J.N. Van. (2008). *Limits to the critical current in Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x tape conductors: the parallel path model*. Nieuwegein, Institute for Plasma Physics Rijinhuizen: Association EURETOM-FOM.
- Godeke, Arno. (2006). *Superconductors in large scale applications: materials, production and purposes*. University of Wisconsin–Madison: Applied Superconductivity Center.
- Han Z. (2000). *Local transport measurements in laser patterned BSCCO-Ag tape*. China, Tsinghua University Beijing: Department of Physics dan Applied Superconductivity Research Center.
- Hassenzahl, William. (2004). *Superconducting materials*. Denver, IEEE PES: Advanced Energy Analysis.
- Kurnianto, A. W. (2010). Simulasi numerik pengaruh variasi ukuran bahan superkonduktor tipe II mesoscopic terhadap dinamika vortex berdasarkan model Ginzburg-Landau (Doctoral dissertation, Universitas Negeri Malang).
- Maulana, Alan. (2001). *Fabrikasi dan karakterisasi pita superkonduktor Bi-2223/Ag monofilame*. Institut Teknologi Bandung: Material Science and Engineering.
- Musenich, Riccardo. (2000). *Applications of magnesium diboride to particle physics*. Genova: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare.
- Nurwantoro, P. (1998). *A theoretical study of surface nucleation field at h_{c3} and of superconducting surface sheaths in isotropic type-II superconductors*. University of Birmingham. Tidak dipublikasikan.
- Penrose, Howard, W. (2006). *Motor testing made easy*. US Department of Energy: ALL- TEST Pro Instruments.
- Taoufik, A. (2006). *Anisotropy of the critical current density high quality YBa₂Cu₃O_{7-δ} thin film*. Morocco, Universite Ibn Zohr: Department de Physique Faculte des Sciences.
- Tinkham, Michael. (1996). *Interoduction to superconductivity*. Harvard University, Singapore: International Series in Pure and Applied Physisc.
- Ulfaty, D. (2007). Analisis karakteristik intrinsik B^* dan T^* dalam bahan superkonduktor sistem BSCCO pada diagram fase vorteks BT/oleh Diena Ulfaty (Doctoral dissertation, Universitas Negeri Malang).
- Usak, P. (2003). *Random instabilities of curren–voltage curves of BSCCO-2223/Ag multifilamentary Tape in LN2 at 77 K*. Bratislava, Institute of Electrical Engineering: Superconductor Science and Technology.
- Zola, D. (2003). *Study of coupling loss on bi-columnar BSCCO/Ag tape by a.c. susceptibility measurements*. Italy, Uninersity of Salerno Italy: Department of Physics E R dan INFN Research Unit.