

PENINGKATAN RAPAT ARUS KRITIS SUPERKONDUKTOR BSCCO-2223 DENGAN PENAMBAHAN Ag

Yustinus Purwamargapratala, E. Sukirman, Didin Sahidin W, dan Wisnu Ari Adi

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

ABSTRAK

PENINGKATAN RAPAT ARUS KRITIS SUPERKONDUKTOR BSCCO-2223 DENGAN PENAMBAHAN Ag. Pembuatan komposit $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}/\text{Ag}$ (BSCCO/Ag) dengan penambahan 0% berat Ag; 2,5% berat Ag; 5% berat Ag; dan 10 % berat Ag telah dilakukan. Pembuatan dilakukan dengan metode pirolisis menggunakan garam cair urea sebagai pelarut. Sintering sampel dilakukan pada suhu 845 °C di lingkungan udara biasa selama 72 jam. Hasil pengukuran sampel dengan probe empat titik menunjukkan bahwa untuk penambahan 0 % berat Ag; 2,5 % berat Ag; 5 % berat Ag; dan 10 % berat Ag diperoleh rapat arus kritis J_c berturut-turut adalah $3,3 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}$; $5,9 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}$; $10,4 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}$; dan $20,0 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}$. Sedangkan suhu transisi kritis T_c sekitar 105 K dan tidak ada perubahan yang berarti untuk masing-masing sampel. Hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa butir-butirnya berbentuk seperti plat (*plate like*) dengan ukuran yang bervariasi. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan Ag pada superkonduktor BSCCO-2223 maka rapat arus kritis bahan menjadi lebih baik karena Ag dapat menempati ruang antar butiran.

Kata kunci : Rapat arus kritis, superkonduktor, BSCCO, penambahan Ag

ABSTRACT

THE INCREASING OF THE CRITICAL CURRENT DENSITY ON BSCCO-2223 SUPERCONDUCTOR BY SILVER ADDITION. The synthesis of BSCCO/Ag superconductor composite with the addition of 0, 2.5, 5, and 10 wt % Ag by pyrolysis method has been performed. In this method was used urea molten salt as solvent. The samples were sintered at 845 °C for 72 hours on air. The critical current densities of the samples were 3.3×10^6 , 5.9×10^6 , 10.4×10^6 , and $20.0 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}$ by addition of 0, 2.5, 5, and 10 wt % Ag, respectively. The J_c measurement results were $3.3 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}$, $5.9 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}$, $10.4 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}$, and $20.0 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}$ with addition of 0, 2.5, 5, and 10 wt % Ag, respectively. There were no significantly different in critical temperature at about 105 K. Microstructure analysis using SEM shows that the samples have plate like grains with various sizes. This result shows that the silver addition can increase the critical current density on the BSCCO-2223 superconductor.

Key words : Critical current density, superconductor, BSCCO, Addition Ag

PENDAHULUAN

Salah satu logam mulia yang tidak merusak sifat superkonduktivitas bahan khususnya untuk superkonduktor keramik adalah perak (Ag). Penambahan Ag dalam superkonduktor keramik tersebut dapat meningkatkan sifat mekanik dan sifat listrik terutama rapat arus kritis (J_c) bahan. Didin dan kawan-kawan [1] telah berhasil menambahkan Ag_2O ke dalam matriks superkonduktor sistem YBCO. Mereka telah membuktikan bahwa penambahan Ag_2O ke dalam superkonduktor sistem YBCO tidak mengubah sifat superkonduktivitas bahan dan menghasilkan efek *flux pinning* yang cukup kuat sehingga rapat arus kritis dapat meningkat sangat signifikan.

Pada penelitian sebelumnya telah dipelajari mengenai interaksi perak (Ag) dengan superkonduktor BSCCO-2223 (fasa-2223) [2]. Sintesis superkonduktor

BSCCO/Ag tersebut disinter pada suhu 845 °C selama 72 jam di udara. Hasil penelitian tersebut menyimpulkan bahwa Ag (0 – 10 % berat Ag) dapat menurunkan T_c (BSCCO-2223) hingga $T_c = 103 \text{ K}$ dari 110 K. Ag ini berperan mempromosikan terjadinya dekomposisi BSCCO-2223 menjadi BSCCO-2212 (fasa-2212) dan memunculkan fasa impuritas (CuO , Ca_2CuO_3 , dan Ca_2PbO_4). Hasil yang sama diperoleh juga oleh Sarkar dan kawan-kawan [3], mereka melaporkan bahwa dengan penambahan perak sampai 15 % volume, T_c bahan ini turun sebanyak 40 K dan fasa-2223 relatif berkurang terhadap fasa-2212 dibandingkan dengan sampel BSCCO murni. Penurunan T_c ini akan berdampak pada rendahnya rapat arus kritis (J_c) bahan tersebut karena rentang suhu operasinya semakin pendek. Sedangkan syarat aplikasi praktis adalah bahan tersebut harus memiliki rapat arus

kritis (J_c) yang cukup tinggi dalam orde 10^9 - 10^{10} A.m⁻² pada suhu $T = 77$ K [4].

Chui dan kawan-kawan [5], juga telah melakukan penelitian tentang pengaruh suhu *sintering* terhadap sifat superkonduktivitas dan strukturmikro komposit BPSCCO/Ag dengan variasi penambahan 0%berat sampai dengan 50 %berat Ag₂O. Berdasarkan data DTA, suhu *onset* menuju *partial melting* untuk BSCCO murni adalah 869 °C dengan puncak endotermik pada suhu 889 °C. Sedangkan campuran BSCCO yang mengandung 10 % berat Ag memiliki suhu *onset* menuju *partial melting* pada 849 °C dengan puncak endotermik pada 865 °C. Mereka menyimpulkan bahwa penambahan Ag (0 %berat sampai dengan 50 %berat Ag₂O) tidak akan merusak sifat superkonduktivitas bahan apabila komposit tersebut *disinter* di udara pada suhu di bawah titik lebur (*peritectic point*).

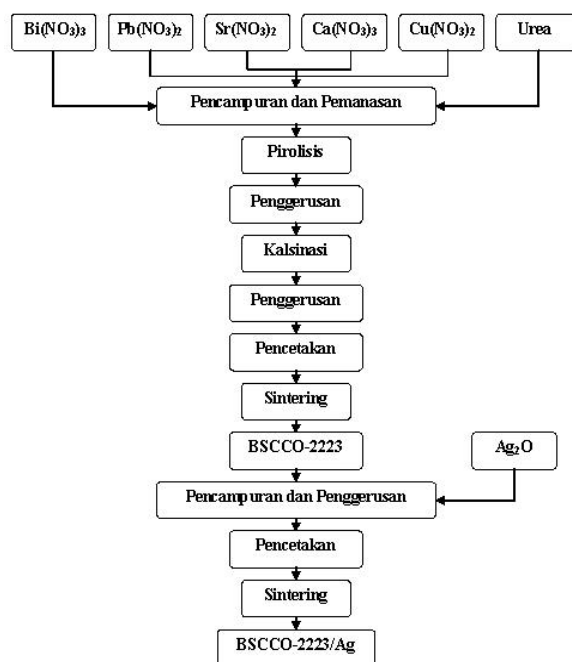
Pada penelitian sekarang akan dilakukan pembuatan dan karakterisasi komposit BSCCO/Ag (0 %berat sampai dengan 10 %berat Ag) dengan menggunakan pelarut garam urea cair. Urea NH₂COONH₂ merupakan media yang baik untuk pembuatan bahan superkonduktor keramik [6, 7]. Dibandingkan dengan reaksi padatan (*solid state reaction*), pembuatan komposit BSCCO-2223/Ag melalui media urea cair tidak diperlukan penggerusan berulang-ulang, karena pencampuran di media basah memungkinkan atom-atom penyusun dapat bereaksi dengan urea sehingga setelah proses pirolisis dihasilkan serbuk yang lebih homogen. Disamping itu, urea adalah bahan yang relatif murah dan mudah diperoleh di pasaran. Jadi penelitian ini bertujuan untuk membuat prekursor komposit BSCCO/Ag yang memiliki rapat arus kritis tinggi.

METODE PERCOBAAN

Prekursor superkonduktor sistem BSCCO dibuat melalui reaksi kimia dengan mencampurkan bahan penyusun garam-garam nitrat, seperti : Bismut Nitrat Bi(NO₃)₃, Timbal Nitrat Pb(NO₃)₂, Stronsium Nitrat Sr(NO₃)₂, Kalsium Nitrat Ca(NO₃)₂, dan Tembaga Nitrat Cu(NO₃)₂, pada perbandingan stokiometri unsur Bi : Pb : Sr : Ca : Cu = 1,6 : 0,4 : 2 : 2 : 3.

Sedangkan serbuk Ag₂O diperoleh dari *STREM* dengan kemurnian 99+ %. Proses pembuatan komposit BSCCO/Ag ini dapat ditunjukkan dalam diagram alir pada Gambar 1.

Garam-garam nitrat tersebut dicampur dengan urea kemudian dipanaskan sambil diaduk sampai terjadi pelarutan dan pengeringan kembali. Hasil pencampuran tersebut dipirolisis pada suhu 300 °C, 500 °C, dan 700 °C masing-masing selama 1 jam yang bertujuan untuk menghilangkan zat-zat volatil (mudah menguap). Serbuk kering hasil percampuran tersebut digerus dengan menggunakan mortar, kemudian dikalsinasi pada suhu 800 °C selama 24 jam. Selanjutnya serbuk hasil kalsinasi



Gambar 1. Diagram alir proses pembuatan komposit BSCCO/Ag

digerus kembali dan dicetak dalam bentuk pelet (silindris) berukuran diameter 15 mm dengan tekanan 8 ton.m⁻². Sampel-sampel yang telah dicetak tadi disinter pada suhu 845 °C selama 72 jam di dalam aliran udara biasa. Sampel hasil *sintering* tersebut diuji sifat levitasnya, yaitu dengan cara : sampel tersebut direndam ke dalam nitrogen cair selama 10 menit, kemudian satu per satu diletakkan di atas permukaan magnet permanen. Apabila sampel melayang di atas permukaan magnet tersebut, maka bahan tersebut diindikasikan sebagai bahan superkonduktor dan begitu sebaliknya.

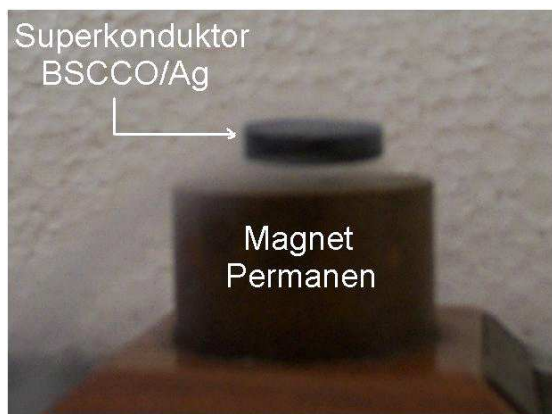
Sampel-sampel tersebut digerus kembali, kemudian ditimbang 4 cuplikan dengan neraca analitik masing-masing dengan berat 4 gram dan ditambahkan serbuk Ag₂O sebanyak 0%berat Ag ; 2,5%berat Ag ; 5%berat Ag ; dan 10 %berat Ag yang selanjutnya berturut-turut disebut dengan sampel BSCCO/Ag 0 %, BSCCO/Ag 2,5 %, BSCCO/Ag 5 %, dan BSCCO/Ag 10 %. Keempat cuplikan yang telah ditambahkan Ag₂O tersebut dicetak kembali dalam bentuk pelet (sampel silindris) berukuran diameter 15 mm dengan tekanan 8 ton.m⁻² dan disinter ulang pada suhu 845 °C selama 72 jam di dalam udara biasa.

Pengamatan strukturmikro sampel dilakukan dengan bantuan SEM (*Scanning Electron Microscope*) merek *Philip 515*. Sedangkan kualitas dan kuantitas fasa-fasa yang ada di dalam sampel diamati dengan teknik difraksi sinar-x. Alat yang digunakan adalah *X-ray Diffractometer Shimadzu*. Pengukuran pola difraksi sampel dilakukan dengan berkas sinar-x dari *tube anode* Cu dengan panjang gelombang, $\lambda = 1,5406$ Å, *mode*= *continuous-scan*, *step size* = 0,02°, dan *time per step* = 0,5 detik. Rapat arus kritis J_c sampel diukur

dengan menggunakan Metode *Four Point Probe* (MFPP) [8]. Eksperimen tersebut dilakukan di Puslitbang Iptek Bahan - BATAN. Pengukuran suhu transisi kritis T_c ditentukan dengan susceptibilitas magnet terhadap suhu yang dilakukan di Pusat Penelitian Fisika - LIPI.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Salah satu foto hasil pengujian efek *Meissner* untuk mengetahui sifat superkonduktivitas sampel diperlihatkan pada Gambar 2. Sedangkan hasil pengujian efek *Meissner* untuk keempat sampel ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 2. Efek Meissner dari sampel BSCCO/Ag 10%

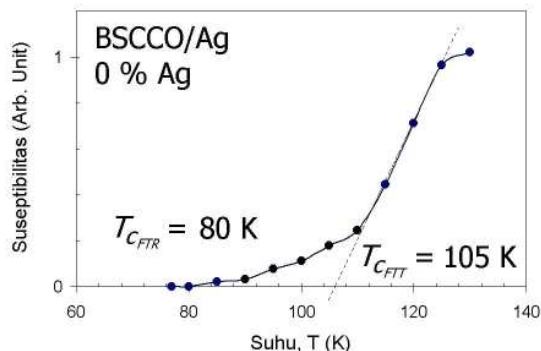
Tabel 1. Efek *Meissner* dari sampel BSCCO/Ag 10%

Nama sampel	Penambahan Ag_2O (% berat Ag)	Hasil pengujian efek <i>Meissner</i>
BSCCO/Ag 0 %	0	Melayang
BSCCO/Ag 2,5 %	2,5	Melayang
BSCCO/Ag 5 %	5	Melayang
BSCCO/Ag 10 %	10	Melayang

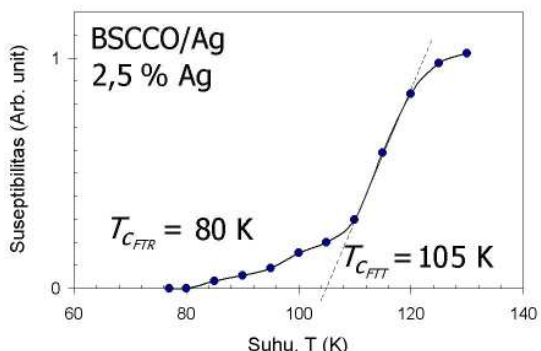
Tampak pada Tabel 1 bahwa keempat sampel melayang di atas permukaan magnet permanen SnCo. Hal ini menunjukkan bahwa apabila medan magnet luar yang diterapkan berubah terhadap waktu atau tetap, maka bahan ini akan memberikan respon efek perisai yang menolak perubahan medan tersebut. Dalam keadaan ini bahan bersifat diamagnetik sempurna dan lazim disebut bahan berada dalam kondisi *Meissner*.

Suhu transisi kritis (T_c) keempat sampel ini ditunjukkan pada Gambar 3. Pada Gambar 3 diperlihatkan bahwa susceptibilitas magnet semakin bertambah dengan meningkatnya suhu. Berdasarkan pada teori *Bardeen Cooper Schrieffer* (BCS) bahwa apabila pada bahan tersebut diterapkan medan magnet sebesar H maka hal ini juga berarti pemberian energi sebesar $\frac{1}{2} \mu_0 M H$ kepada bahan tersebut [9]. Sedangkan besarnya energi kinetik pasangan elektron yang sering disebut dengan *pair interaction energy*, yaitu energi yang diperlukan untuk

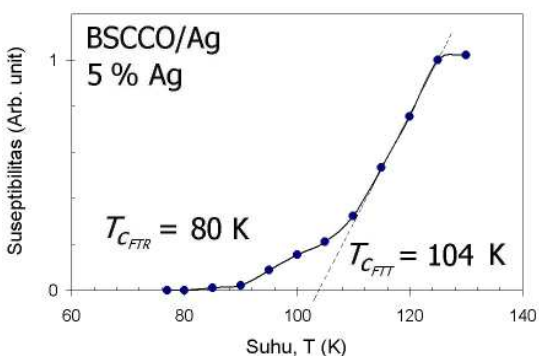
pembentukan pasangan elektron (*cooper pair*) sangat bergantung pada suhu [10]. Apabila suhu T jauh di bawah T_c maka *pair interaction energy* ini akan semakin



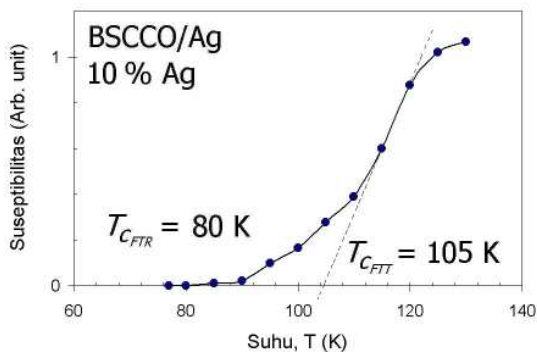
(a) BSCCO/Ag 0%



(b) BSCCO/Ag 2,5%



(c) BSCCO/Ag 5%

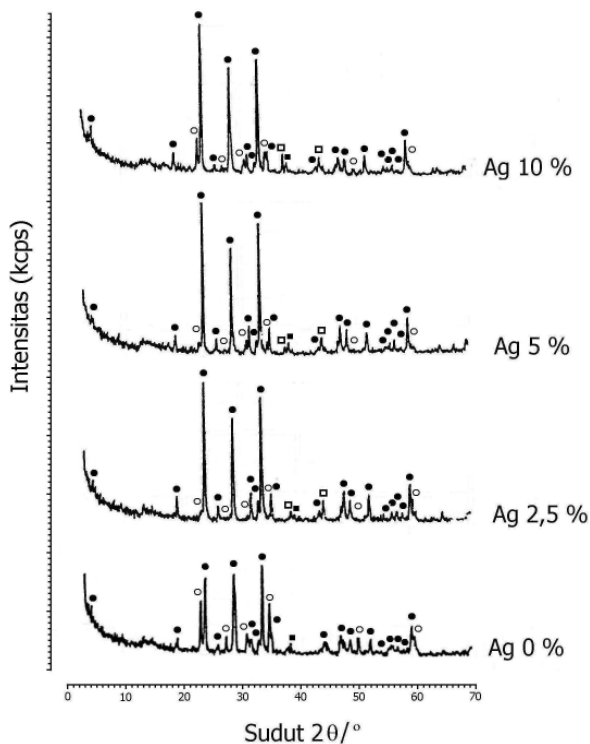


(d) BSCCO/Ag 10%

Gambar 3. Susseptibilitas magnet terhadap suhu

besar. Apabila suhu T mendekati harga T_c maka besarnya *pair interaction energy* ini akan semakin kecil. Pada akhirnya besarnya energi eksternal $\int_{\mu_0}^{H_{ext}}$ ini akan lebih besar dari *pair interaction energy*, sehingga terjadi transfer fasa dari keadaan superkonduksi ke keadaan normal. Dengan kata lain bahwa energi eksternal ini sama dengan energi yang diperlukan untuk memutuskan ikatan electron berpasangan (*depairing*) menjadi elektron normal.

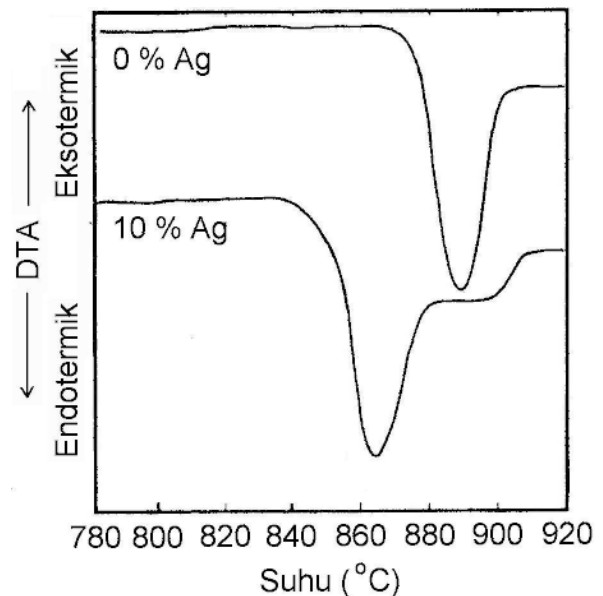
Pada Gambar 3 tampak adanya dua transisi T_c , yaitu T_c untuk BSCCO-2223 dan BSCCO-2212 yang berturut turut disebut dengan fasa T_c tinggi (T_c FTT) dan fasa T_c rendah (T_c FTR). Nilai T_c FTT untuk sampel BSCCO/Ag 0 %, BSCCO/Ag 2,5 %, BSCCO/Ag 5 %, dan BSCCO/Ag 10 % berturut-turut adalah 105 K, 105 K, 104 K, dan 105 K. Sedangkan T_c FTR tampak sama yakni 80 K. T_c FTT tampak relatif sama dengan bertambahnya kandungan Ag di dalam sampel. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan Ag tidak mempengaruhi kestabilan fasa matrik BSCCO-2223. Hasil ini didukung lebih lanjut oleh pola difraksi sinar-x seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pola difraksi sinar-x sampel BSCCO/Ag dengan penambahan Ag(0–10%) (●) BSCCO fasa 2223, (○) BSCCO fasa 2212, (□) Ag, dan (■) CuO

Identifikasi fasa-fasa pada Gambar 4 merujuk pada makalah Chiu dan kawan-kawan [5], kemudian dikonfirmasi dengan database JCPDS - International Center for Diffraction Data (ICDD) tahun 1997 [11-14].

Pada Gambar 4 terlihat bahwa kualitas maupun kuantitas BSCCO-2223 tidak berubah dengan meningkatnya kandungan Ag sampai 10 % di dalam sampel. Hal ini menunjukkan bahwa dengan suhu sintering 845 °C ini, Ag tidak bereaksi dengan matrik BSCCO-2223. Hasil ini bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh Chiu [5] dan Dou [15] yang melaporkan bahwa berdasarkan data DTA, suhu onset menuju *partial melting* untuk BSCCO murni adalah 869 °C dengan puncak endotermik pada suhu 889 °C. Sedangkan campuran BSCCO yang mengandung 10 % berat Ag memiliki suhu onset menuju *partial melting* pada 849 °C dengan puncak endotermik pada 865 °C seperti yang terlihat pada Gambar 5.



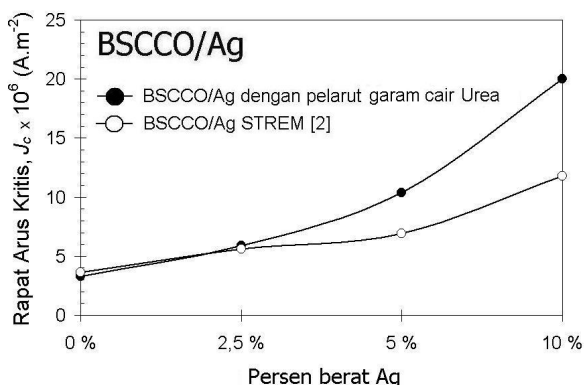
Gambar 5. Kurva DTA untuk BSCCO/Ag (0% dan 10% berat) [3]

Gambar 5 menunjukkan bahwa penambahan Ag_2O menurunkan suhu lebur (*peritectic point*) pada sistem ini dari 889 °C menjadi 865 °C. Hal ini disebabkan titik lebur Ag_2O lebih rendah dari superkonduktor BSCCO. Penambahan Ag_2O juga dapat mengakibatkan terjadinya larutan padat $Ag_2O-PbO-CuO$. Larutan padat $Ag_2O-PbO-CuO$ terdekomposisi pada suhu antara 187 °C sampai dengan 450 °C dan stabil pada suhu di atas itu [3]. Apabila dekomposisi ini terjadi pada suhu tinggi (suhu sintering), maka Ag_2O akan terdekomposisi menjadi Ag. Dan Ag ini yang mempromosikan terjadinya dekomposisi fasa dari superkonduktor BSCCO ini. Namun apabila proses sintering ini dilakukan pada suhu dibawah titik *onsetnya* (*partial melting*), maka Ag ini tidak akan bereaksi dengan matriksnya.

Pada Gambar 4 tampak fasa Ag semakin meningkat dan muncul pada sudut $2\theta = 38,12^\circ$ dan $44,28^\circ$. Fasa impuritas yaitu fasa CuO yang muncul pada sudut $2\theta = 38,73^\circ$ diduga sebagai penyebab rendahnya T_c FTT ini. Dari hasil pengukuran T_c dan analisis XRD

ini dapat ditarik kesimpulan bahwa komposit BSCCO/Ag ini sudah terbentuk.

Gambar 6 memperlihatkan hasil pengukuran rapat arus kritis (J_c) sebagai fungsi penambahan persen berat Ag. Tampak bahwa nilai rapat arus kritis (J_c) semakin meningkat dengan bertambahnya kandungan Ag di dalam sampel. Harga J_c untuk sampel BSCCO/Ag 0 %, BSCCO/Ag 2,5 %, BSCCO/Ag 5 %, dan BSCCO/Ag 10 % berturut-turut adalah $3,3 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}$; $5,9 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}$; $10,4 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}$; dan $20,0 \times 10^6 \text{ Am}^{-2}$.



Gambar 6. Rapat arus kritis versus penambahan Ag di dalam sampel

J_c dari komposit BSCCO/Ag yang dibuat dengan menggunakan pelarut garam cair urea ini tampak meningkat dua kali lipat dibandingkan dengan J_c hasil penelitian terdahulu, yaitu dari STREM [2]. Ada beberapa faktor yang menyebabkan harga J_c naik, yaitu : porositas dan *weak link*, ukuran butir, keteraturan butir (*grain alignment*), dan *fluks pinning* [16-18].

Hasil ini didukung oleh pengamatan struktur mikro dengan menggunakan SEM seperti yang terlihat pada Gambar 7. Pada Gambar 7 menunjukkan bahwa struktur seperti pelat (*plate like*) nampak jelas terlihat di semua sampel. Struktur seperti pelat (*plate like*) pada sampel BSCCO/Ag 2,5 %, BSCCO/Ag 5 %, dan BSCCO/Ag 10 % ini memiliki bentuk yang sama (*similar*) dengan sampel BSCCO/Ag 0 %. Dan struktur (*plate like*) ini nampak semakin besar dengan bertambahnya kandungan Ag di dalam sampel. Hal ini menunjukkan bahwa Ag dapat menghapuskan adanya isolasi di daerah *weak link* (*eliminate the insulating weak link regions*). Dengan demikian porositas dan sumber-sumber *weak link* semakin berkurang.

Faktor lainnya adalah besarnya ukuran butir. Pembuatan prekursor BSCCO dengan pelarut garam cair urea ini cenderung memperoleh ukuran butir yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan reaksi padatan [6, 7, 16]. Semakin kecil ukuran butirnya semakin besar luas permukaan kontak antara butir satu dengan butir yang lain, akibatnya kerapatan bahan dan J_c meningkat [16].

Keteraturan butiran (*grain alignment*) pada umumnya dapat diperoleh dari hasil proses pelelehan



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 7. Struktur mikro dari sampel (a) BSCCO/Ag 0%, (b) BSCCO/Ag 2,5%, (c) BSCCO/Ag 5%, (d) BSCCO/Ag 10%.

bahan (*melting process*) [17]. Kemudian faktor yang terakhir adalah adanya *fluks pinning* yang cukup kuat. Arus yang mengalir dalam bahan superkonduktor akan menimbulkan rapat gaya Lorentz (F_L) pada sistem vortex.

Akibatnya *vortex* dalam keadaan bebas ini akan menimbulkan transport listrik yang disipatif. Sehingga gerakan *vortex* ini perlu dicegah. Untuk itu diperlukan *pinning* untuk mencegah gerak *vortex* ini. Sumber *pinning* ini dapat berupa cacat kristal yang disebabkan oleh impuritas. Pada Gambar 4 jelas terlihat adanya fasa impuritas, yaitu CuO dan Ag. CuO dan Ag yang dimiliki oleh komposit superkonduktor ini ternyata efektif sebagai sumber *pinning* yang kuat untuk menahan gerakan *vortex* (*flux line*) tersebut [18-19].

KESIMPULAN

Pembuatan komposit BSCCO/Ag dengan penambahan 0 %berat Ag; 2,5 %berat Ag ; 5 %berat Ag; dan 10 %berat Ag ke dalam matriks superkonduktor BSCCO-2223 yang *disinter* pada suhu 845 °C selama 72 jam telah berhasil dilakukan. Nilai T_c FTT relatif sama dengan penambahan Ag 0%berat sampai dengan 10 %berat. Penambahan Ag ini tidak mempengaruhi kestabilan matriks BSCCO-2223. Harga J_c meningkat dengan penambahan Ag sebanyak 0 %berat sampai dengan 10 % berat. Ag dapat menghapuskan isolasi di daerah *weak link*. Hal ini terlihat dari struktur seperti pelat (*plate like*) yang semakin membesar.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Bapak Drs. Gunandjar, S.U. selaku Kepala Puslitbang Iptek Bahan BATAN, almarhum DR. Wuryanto sebagai pelopor kemajuan kelompok superkonduktor, kepada DR. Ridwan selaku Kepala Bidang Bahan Maju P3IB BATAN yang telah memberikan kesempatan untuk penelitian, Dra. Grace Tj. Sulungbudi, dan kepada semua pihak yang telah membantu dalam kelancaran penulisan makalah ini.

DAFTARACUAN

- [1]. WINATAPURA, D.S., WISNU, A. A., *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **1**(3) (2000) 21-26
- [2]. YUSTINUS, P., WISNU ARI ADI, Interaksi Ag dengan Superkonduktor BSCCO Fasa 2223, *sedang dalam proses penerbitan pada Jurnal Teknik Mesin Trisakti*.
- [3]. SARKAR, A.K., MAARTENSE, I., PETERSON, T.L., *J. Mater. Res.*, **7** (1992) 1672
- [4]. MURAKAMI, M., *Supercond. Sci. Technol.* **5** (1992) 185-203
- [5]. CHIU, Y.D., LEI, T.S., KAO, C.H., *Journal of Materials Science*, **29** (1994), 2678 – 2682
- [6]. YUSTINUS P, IDRA GUNAWAN, WURYANTO, Pembuatan Komposit YBCO-123/Ag Melalui Pelarut Garam Cair Urea, *Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, PPNY - BATAN, Buku II, (1996) 85-91

- [7]. WURYANTO, Sintesis Superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ Melalui Prekursor Hasil Pirolisis Garam Cair Urea dan Ammonium Nitrat, *Prosiding Seminar Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar dan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, Yogyakarta, (1994)
- [8]. WISNU ARIADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA, GRACE TJ. SULUNGBUDI, *Majalah BATAN*, **XXXIV** (1/2) (2001) 15-30
- [9]. ROSE-INNES, A.C., RHODERICK, E.H., *Introduction to Superconductivity*, Pergamon Press, Oxford, (1969) 92-110
- [10]. BUCKEL, W., *Superconductivity*, VCH Publisher Inc., New York, (1991) 112-159
- [11]. PANDEY, D., *et al.*, *Physica C, Superconductivity*, **173** (1991) 476
- [12]. WEST, A., *University of Aberdeen, Old Aberdeen, Scotland, ICDD Grant-in-Aid* (1990)
- [13]. SWANSON, TATGE, *Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **Ciro**, **539** (1) (1953) 23
- [14]. MARTIN, K., MCCARTHY, G., *North Dakota State Univ., Fargo, ND, USA, ICDD Grant-inAid*, (1991)
- [15]. DOU, S.X., SONG, K.H., LIU, H.K., SORRELL, C.C., APPERLEY, M.H., GOUCH, A.J., SAVVIDES, N., HENSLEY, D.W., *Physica C*, **160** (1989) 533-540
- [16]. WISNU ARI ADI, GRACE TJ. S., DIDIN S. WINATAPURA, E. SUKIRMAN, ARI HANDAYANI dan OCTAVIANUS, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **4**(3) (2003) 8-14
- [17]. WISNU ARI ADI, E. SUKIRMAN, DIDIN S. W., GRACE TJ. S., M. RIFAI M. dan RIDWAN, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **3**(3) (2002) 9-14
- [18]. WISNU ARI ADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA dan GRACE TJ. SULUNGBUDI, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **3**(1) (2001) 38-44.
- [19]. ROSE-INNES, A.C., RHODERICK, E.H., *Introduction to Superconductivity*, Pergamon Press, Oxford, (1969) 92-110