

## PENGARUH PENAMBAHAN $\text{Ag}_2\text{O}$ TERHADAP RAPAT ARUS KRITIS SUPERKONDUKTOR $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ HASIL PROSES PELELEHAN

Didin S. Winatapura, Wisnu Ari Adi, Yustinus P. dan E. Sukirman

Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN) - BATAN

Kawasan Puspipstek, Serpong 15314, Tangerang

### ABSTRAK

**PENGARUH PENAMBAHAN  $\text{Ag}_2\text{O}$  TERHADAP PENINGKATAN RAPAT ARUS KRITIS SUPERKONDUKTOR  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  HASIL PROSES PELELEHAN.** Telah dilakukan pembuatan superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) dan  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Ag}$  (YBCO/Ag) menggunakan metode *Modified Melt Textured Growth (MMTG)*. Pembuatan prekursor menggunakan metode reaksi padatan dari bahan-bahan dasar  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$  dan  $\text{CuO}$  dengan kemurnian 99,99 persen. Pembuatan cuplikan YBCO/Ag dilakukan dengan cara menambahkan serbuk  $\text{Ag}_2\text{O}$  untuk 10 dan 30 persen berat. Pengujian cuplikan dilakukan dengan efek *Meissner*, teknik difraksi sinar-x (XRD), *Scanning Electron Microscope (SEM)*, mikroskop optik (MO), *Electron Dispersion X-rays (EDX)*, dan metode *probe* empat titik. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa cuplikan merupakan bahan superkonduktor YBCO yang memperlihatkan fenomena superkonduktivitas pada suhu nitrogen cair dan telah mengkristal dengan baik dengan dicirikan oleh puncak pola difraksi yang tajam. Cuplikan hasil *sinter* memiliki sedikit *porous*, berbutir halus dan strukturmikro yang terorientasi secara acak. Sebaliknya, cuplikan hasil proses pelelehan memperlihatkan strukturmikro yang rapat dan *highly textured* yang tersusun dari butiran berukuran panjang berbentuk pelat. Butiran bentuk pelat diidentifikasi sebagai fasa YBCO. Fasa lain yang diendapkan didalam dalam *bulk* YBCO diketahui sebagai fasa  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  (211) dan fasa Ag. Suhu kritis,  $T_c \approx 91$  K dari semua cuplikan dan tidak memperlihatkan perubahan yang signifikan. Dari kurva I-V diperoleh rapat arus kritis  $J_c = 3,98 \text{ A.cm}^{-2}$ ;  $135,35 \text{ A.cm}^{-2}$ ;  $143,32 \text{ A.cm}^{-2}$  dan  $282,644 \text{ A.cm}^{-2}$ , berturut turut untuk cuplikan CSIN, YM- $\text{Ag}_2\text{O}$ , YM-10 $\text{Ag}_2\text{O}$  dan YM-30 $\text{Ag}_2\text{O}$ . Dapat disimpulkan bahwa dengan substitusi  $\text{Ag}_2\text{O}$  pada *bulk* YBCO dapat meningkatkan nilai  $J_c$ .

**Kata kunci :** Superkonduktor, *modified melt-textured growth*, strukturmikro, tekstur, rapat arus kritis

### ABSTRACT

**THE INFLUENCE OF  $\text{Ag}_2\text{O}$  ADDITION TO THE INCREASE OF THE CRITICAL CURRENT DENSITY ON MELT-GROWN  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  SUPERCONDUCTOR.** Synthesis of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) and  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}/\text{Ag}$  (YBCO/Ag) superconductor using modified melt-textured growth (MMTG) method has been done. The precursor was made by solid state reaction from  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ , and  $\text{CuO}$  raw materials of 99.99% purity. Synthesis YBCO/Ag specimen was done by adding 10 and 30 weight percent of  $\text{Ag}_2\text{O}$  powder. The specimens were tested using Meissner effect, x-rays diffraction (XRD) technique, scanning electron microscope (SEM), optical microscope (OM), electron dispersion x-rays (EDX), and four point probe method. The result showed that all the tested specimens were superconductor materials by showing superconductivity phenomenon at liquid nitrogen temperature, and diffraction pattern of sharply peak. The sintered specimen exhibits somewhat porous, fine-grained, and randomly oriented microstructure. By contrast, the melted specimen shows a dense and high-aligned microstructure consisting of long, plate-shape grains. The plates were identified as YBCO phase. Another precipitated phase inside YBCO phase was known as  $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$  (211) and Ag phase. The critical temperature,  $T_c \approx 91$  K for all the specimens and did not change significantly. The critical current density obtained are 3.98, 135.35, 143.32 dan 282.64  $\text{A.cm}^{-2}$  for CSIN, YM- $\text{Ag}_2\text{O}$ , YM-10 $\text{Ag}_2\text{O}$ , and YM-30 $\text{Ag}_2\text{O}$  specimens respectively. It is concluded that by substitution of  $\text{Ag}_2\text{O}$  inside the YBCO bulk could increased the critical current density,  $J_c$ .

**Key words :** Superconductor, *modified melt-textured growth*, microstructure, texture, critical current density

### PENDAHULUAN

Superkonduktor suhu tinggi (SKST) adalah bahan keramik oksida yang berinduk pada senyawa kuprat ( $\text{CuO}$ ) pada umumnya tersusun dari komposisi kimia yang *multielemen*. Akibatnya, bahan baru ini

bersifat *multiphase*, memiliki struktur kristal yang berlapis yang mencirikan adanya derajat anisotropi, sehingga mudah diganggu oleh efek fluktuasi termal. Bahan SKST ini telah dikembangkan dalam aplikasi

teknologi yang bervariasi luas, mulai dari aplikasi piranti elektronik (*electronic device*), efek levitasi magnetik, *Superconducting Fault-Current Limiter (SFCL)*, *Superconducting Magnetic Energy Storage System (SMES)*, kabel transmisi daya, magnet superkonduktor, *Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)*, pemanfaatan SKST dalam *accelerator* dan dalam pembuatan reaktor fusi *Tokamak* [1-5]. Di dalam berbagai aplikasi, salah satu parameter penting yang sangat dianjurkan untuk lebih ditingkatkan adalah rapat arus kritis,  $J_c$ .

Pada penelitian sebelumnya  $J_c$  pada YBCO hasil pelelehan telah berhasil diperoleh dengan nilai sekitar  $3,43 \times 10^3$  dan  $230 \text{ A.cm}^{-2}$  berturut-turut diukur dengan magnetometer *SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)* [6] dan *probe* empat titik [7]. Pengukuran dengan magnetometer *SQUID* dilakukan dengan cara mengukur momen magnet tanpa menyentuh cuplikan (*contactless measurement*). Pengukuran dengan cara ini mampu menghasilkan  $J_c \approx$  orde  $10^6 \text{ A.cm}^{-2}$ . Dalam makalah ini, pengukuran cuplikan dilakukan dengan peralatan *probe* empat titik, yaitu dengan cara mengukur arus kritis dengan menyentuh cuplikan (*contact measurement*) yang hanya mampu menghasilkan  $J_c \approx 10^2 \text{ A.cm}^{-2}$ . Beberapa parameter yang mempengaruhi  $J_c$  antara lain *grain alignment*, kandungan dan dimensi dari impuritas [7-9].

Permasalahan yang berkaitan dengan *weak link* pada batas butir sudut besar (*High-Angle Grain Boundary*) pada superkonduktor YBCO telah dapat diatasi dengan cara memberikan *Melt Growth Process* yang menghasilkan YBCO/211 *single grain* [8]. Penambahan  $Ag/Ag_2O$  pada *bulk* YBCO dilakukan karena jumlah fasa 211 yang terbentuk didalam *bulk* melalui proses pelelehan kurang dari 20 persen. Sementara itu, kehadiran fraksi fasa impuritas di dalam *bulk* YBCO diperlukan dalam peningkatan nilai  $J_c$  nya disamping terbentuknya struktur mikro yang *highly oriented grains*. Oleh karena itu, penambahan  $Ag$  pada *bulk* YBCO diperkirakan dapat meningkatkan fraksi fasa impuritas yang akan berperan sebagai *flux pinning centers* sehingga  $J_c$  nya meningkat. Telah dilakukan penelitian dengan penambahan fasa 211 pada YBCO. Hasilnya menunjukkan bahwa harga  $J_c$  meningkat drastis untuk kandungan fraksi fasa 211  $\approx 30 \%$  sampai dengan  $35 \%$  [8].

$Ag_2O$  tidak membentuk senyawa dengan fasa YBCO, tetapi mengisi kekosongan pada bidang batas butir, sehingga berperan memperbaiki dan meningkatkan kontak listrik antar butir. Akibatnya, konektivitas bahan secara keseluruhan juga meningkat. Fasa yang terbentuk di dalam *bulk* adalah fasa  $Ag$  metalik, karena  $Ag$  jauh lebih stabil di atas suhu  $189 \text{ }^\circ\text{C}$  dari pada fasa  $Ag_2O$ . Hasil penelitian terdahulu [9-10] menunjukkan bahwa dengan penambahan  $Ag$  pada *bulk* YBCO juga dapat meningkatkan  $J_c$ , *toughness* dan *tensile strength*,

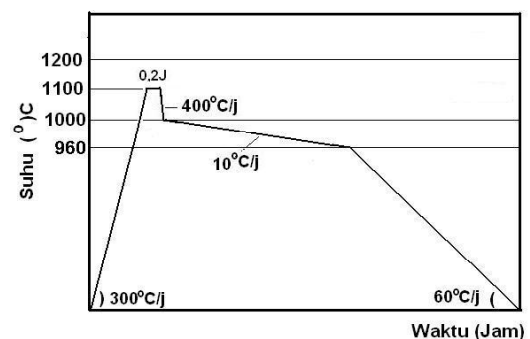
tidak mengubah struktur kristal, dan tidak menurunkan  $T_c$  superkonduksi.

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan  $J_c$  superkonduktor YBCO dengan cara mensubstitusi  $Ag_2O$  melalui proses pelelehan dengan Metode *Modified Melt-Textured Growth (MMTG)* dan mendapatkan informasi fakta-fakta yang mempengaruhi nilai  $J_c$  tersebut.

Dalam makalah ini pembahasan dibatasi pada pembuatan superkonduktor YBCO melalui proses sinter dengan metode reaksi padatan (*solid state reaction*) dan proses pelelehan melalui metode *MMTG* serta mengkarakterisasinya menggunakan efek *Meissner*, teknik *XRD*, Mikroskop Optik, metode *probe* empat titik dan *SEM/EDX*.

## METODE PERCOBAAN

*Bulk* superkonduktor komposit YBCO dan  $Ag_2O$  dalam makalah ini dibuat dari prekursor hasil proses kalsinasi yang dicampur dengan bahan  $Ag_2O$  dalam persen berat 0, 10 dan 30. Proses *sinter* cuplikan dalam bentuk pelet (*bulk*) pada suhu  $940 \text{ }^\circ\text{C}$  selama 7 jam di lingkungan udara biasa. Proses pelelehan cuplikan dilakukan dengan metode *MMTG* sesuai dengan diagram pada Gambar 1 [6,7]. Cuplikan hasil sinter disebut *CSIN* dan hasil *MMTG* diberi nama  $YM-Ag_2O$ ,  $YM-10Ag_2O$  dan  $YM-30Ag_2O$ .



Gambar 1. Diagram proses pelelehan  $YBa_2Cu_3O_{7-x} - Ag_2O$  dengan metode *MMTG* [6,7].

Karakterisasi cuplikan efek efek *Meissner-Ochsenfeld* menggunakan magnet permanent *SmCo*, *SEM/EDS* untuk mengamati permukaan dan teknik *XRD* untuk mengidentifikasi fasa pada posisi  $2\theta = 20^\circ$  hingga  $60^\circ$ . Data pola difraksi *XRD* kemudian dianalisis dengan metode *Rietveld* yang diimplementasikan pada Program *Rietan 95* [11].

Arus dan suhu kritis cuplikan diukur dengan teknik *probe* empat titik di dalam kondisi  $N_2$  cair. Perubahan arus listrik, tegangan dan resistivitas yang terjadi pada bahan direkam dan ditampilkan melalui layar monitor komputer. Program komputer ini dirancang khusus untuk pengukuran  $J_c/T_c$  dengan menggunakan *interface GPIB*. Skematik peralatan *probe* empat titik yang digunakan telah diungkapkan dalam jurnal terdahulu [12].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil pengujian cuplikan dengan peralatan Efek *Meissner-Ochsenfeld* terlihat bahwa semua cuplikan memperlihatkan fenomena superkonduktivitas, yakni melayang di atas permukaan magnet permanent SmCo. Pada keadaan tersebut cuplikan bersifat diamagnetik sempurna. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa seluruh cuplikan merupakan bahan superkonduktor.

Hasil analisis data *XRD* dengan metode *Rietveld* untuk cuplikan CSIN, YM-Ag<sub>2</sub>O, YM-10Ag<sub>2</sub>O dan YM-30Ag<sub>2</sub>O ditunjukkan pada Gambar 4. Harga faktor *R* lebih kecil dari 20, dan faktor *S* sama dengan nilai standar *Rietveld* ( $S_{\text{standar}} = 1,30$ ) pada hasil *refinement* pola difraksi dari seluruh cuplikan tersebut memperlihatkan kualitas bahwa *fitting* kedua pola baik. Parameter kisi (a, b, c) *bulk YBCO* dari seluruh cuplikan tidak mengalami perubahan yang signifikan. Ini berarti bahwa cuplikan *bulk YBCO* hasil *sinter* ataupun hasil *MMTG* dengan dan tanpa substitusi Ag berstruktur kristal sistem ortorombik, dengan parameter kisi rata-rata adalah  $a = 3,88(8) \text{ \AA}$ ;  $b = 3,83(9) \text{ \AA}$ ; dan  $c = 11,73(3) \text{ \AA}$ , grup ruang *Pmmm* no. 47. Fasa Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> (211) atau fasa hijau juga berstruktur kristal sistem ortorombik dengan parameter kisi  $a = 12,14(5) \text{ \AA}$ ;  $b = 5,65(1) \text{ \AA}$ ; dan  $c = 7,23(3) \text{ \AA}$ , grup ruang *Pnma*, No. 62. Sedang fasa Ag berstruktur kristal sistem kubik dengan parameter kisi  $a = 4,71(5) \text{ \AA}$  [12].

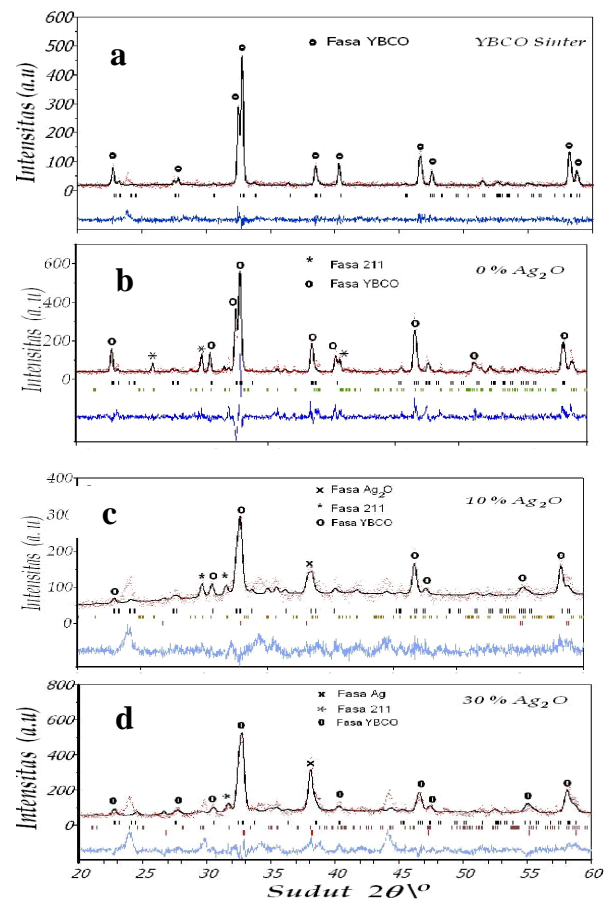
Hasil perhitungan persentase fraksi massa fasa Ag<sub>2</sub>O dan fasa 211 dicantumkan dalam Tabel 1. Tampak bahwa besarnya serbuk Ag<sub>2</sub>O yang disubstitusikan dengan hasil perhitungan hampir sama. Sementara itu, fasa 211 mulai teramati pada cuplikan tanpa Ag<sub>2</sub>O sekitar 25 %. Dengan substitusi Ag<sub>2</sub>O, maka kandungan fasa 211 dalam *bulk YBCO* berkurang. Ini artinya bahwa selama proses dekomposisi, pertumbuhan fasa 211 menyusut dan kedudukannya digantikan oleh fasa Ag. Perihal tersebut sejalan dengan hasil pengukuran cuplikan dengan teknik *XRD*, seperti diperlihatkan pada Gambar 2.

**Tabel 1.** Hasil analisis dengan metode *Rietveld* dari persentase fraksi massa fasa YBCO, 211 dan Ag.

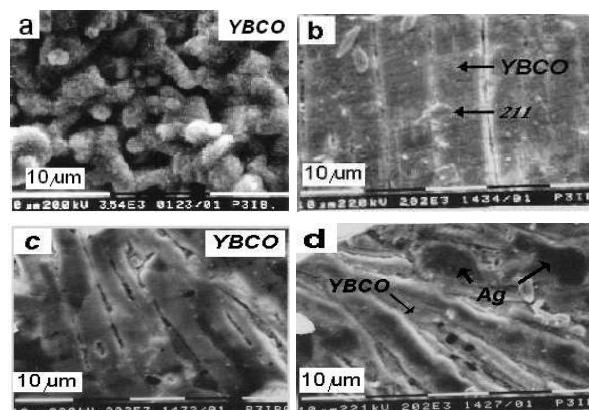
No	Nama cuplikan	(% fraksi massa fasa)		
		YBCO	211	Ag
2.	YM-Ag <sub>2</sub> O	75,05	24,95	-
3.	YM-10Ag <sub>2</sub> O	69,73	21,20	9,00
4.	YM-30Ag <sub>2</sub> O	64,41	6,37	29,20

Dalam menganalisis cuplikan dengan metode *Rietveld*, yang diasumsikan sebagai fasa kedua adalah fasa Ag, hal ini karena pada suhu di atas 187 °C, fasa Ag<sub>2</sub>O tidak stabil dan berubah menjadi fasa Ag yang stabil pada suhu tinggi.

Foto strukturmikro hasil *SEM* ditunjukkan pada Gambar 3. Tampak bahwa strukturmikro cuplikan memperlihatkan perbedaan yang kontras. Cuplikan hasil



**Gambar 2.** Pola difraksi sinar-x dari superkonduktor YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> hasil analisis dengan metode *Rietveld* dari cuplikan a). CSIN, b). YM-Ag<sub>2</sub>O, c). YM-10Ag<sub>2</sub>O dan d). YM-30Ag<sub>2</sub>O.



**Gambar 3.** Foto *SEM* dari strukturmikro cuplikan a). CSIN, b). YM-Ag<sub>2</sub>O, c). YM-10Ag<sub>2</sub>O dan d). YM-30Ag<sub>2</sub>O.

*sinter* (CSIN) memiliki strukturmikro sedikit berpori, *fine-grained* dan terdistribusi secara acak dengan ukuran butiran antara 1 μm hingga 10 μm. Sebaliknya, cuplikan hasil proses *MMTG* memperlihatkan strukturmikro yang rapat (*dense microstructure*) dan *highly textured* yang tersusun dari butiran berukuran panjang berbentuk seperti pelat menuju ke satu arah tertentu dengan batas

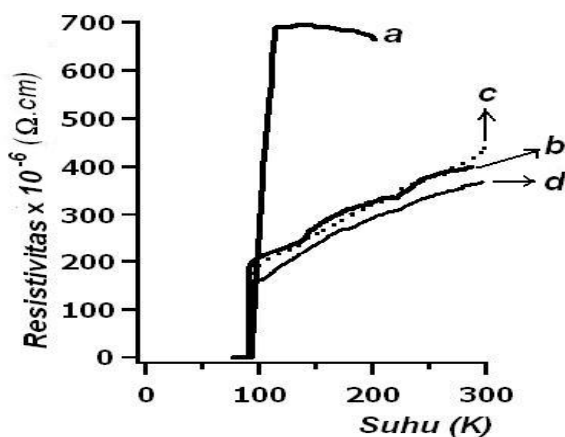
butir yang bersih dan membentuk struktur *twins*. Hasil identifikasi cuplikan menunjukkan bahwa butiran berbentuk pelat tersebut diidentifikasi sebagai fasa YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> (YBCO) dengan ukuran dimensi panjang antara 100 µm sampai dengan 3000 µm dan lebar berukuran antara 3 µm sampai dengan 10 µm, seperti ditunjukkan dalam Tabel 3 [13].

Tabel 2. Komposisi kimia cuplikan diamati dengan SEM/EDS.

Nama Cuplikan	Fasa	Komposisi kimia (% Atom)			
		Y	Ba	Cu	Ag
CSIN	YBCO	16,55	31,89	43,02	-
YM-Ag <sub>2</sub> O	YBCO	22,27	31,50	46,23	-
	211	56,24	22,99	20,87	-
YM-10Ag <sub>2</sub> O	YBCO	16,63	30,02	45,39	-
YM-30Ag <sub>2</sub> O	YBCO	24,01	31,07	44,92	-
	Ag	-	-	-	100,00

Fasa lain yang berbentuk dan terdistribusi di dalam *bulk* diidentifikasi sebagai fasa Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> atau fasa 211 (Gambar 3b) dan fasa Ag (Gambar 3d). Kedua fasa tersebut umumnya terdistribusi hanya pada batas butir, tetapi karena ukuran fasa tersebut cukup besar > 10 µm maka sebagian kedua fasa tersebut diendapkan menutupi butiran YBCO. Fasa Ag tidak membentuk senyawa dengan YBCO, tetapi diendapkan pada batas butir atau pada kekosongan sehingga fasa Ag dapat membantu meningkatkan konektivitas listrik antar butir. Fasa Ag berasal dari substitusi Ag<sub>2</sub>O berbentuk fasa Ag metalik yang stabil diatas suhu 200°C [10]. Sementara itu, fasa 211 merupakan fasa impuritas yang terbentuk oleh akibat terjadinya ketidaksetimbangan komposisi kimia selama proses *melting* dan dekomposisi. Komposisi kimia (dalam % atom) dari seluruh cuplikan yang diidentifikasi dengan EDS dicantumkan dalam Tabel 2.

Gambar 4 menunjukkan grafik hubungan antara resistivitas, r(W.cm) terhadap suhu, T (K) dari cuplikan CSIN dan YM-30Ag<sub>2</sub>O. Kedua cuplikan menampilkan



Gambar 4. Hubungan antara suhu (K) terhadap resistivitas (Ωcm) pada cuplikan a). CSIN, b). YM-Ag<sub>2</sub>O, c). YM-10Ag<sub>2</sub>O dan d).YM-30Ag<sub>2</sub>O

transisi superkonduksi dengan suhu transisi kritis,  $T_c \gg 92K$ . Seperti pada Gambar 4 tampak bahwa resistivitas cuplikan turun sedikit demi sedikit sejalan dengan turunnya suhu dari suhu ruang sampai titik *onset*, yaitu titik awal terjadinya transisi superkonduksi. Pada pendinginan selanjutnya, resistivitas cuplikan tersebut menyusut tajam mendekati nol. Jadi, pada daerah suhu ruang sampai titik *onset*, cuplikan menampilkan sifat logam.

Hasil pengukuran  $T_c$  cuplikan ditunjukkan pada Gambar 4. Tampak bahwa cuplikan menampilkan  $T_c$  yang hampir sama walaupun strukturmikro berbeda sangat kontras. Hal ini karena  $T_c$  adalah besaran intrinsik, artinya  $T_c$  tidak berubah, walaupun strukturmikro cuplikan mengalami perubahan. Data  $T_c$ ,  $I_c$  dan  $J_c$  dari hasil pengukuran dengan peralatan *probe* empat titik semua cuplikan ditunjukkan dalam Tabel 3.

Berbeda dengan  $T_c$ , arus kritis,  $I_c$  adalah besaran ekstrinsik bagi superkonduktor, sehingga bisa diupayakan untuk ditingkatkan dengan melakukan rekayasa pada strukturmikro bahan. Pada Gambar 7 ditunjukkan hasil pengukuran dengan *probe* empat titik, yaitu kurva antara arus,  $I$  (Amper) terhadap tegangan,  $V$  (mvolt). Rapat arus kritis ditentukan dari data perubahan tegangan terhadap perubahan arus yang dialirkan pada cuplikan. Arus,  $I$  (Amper) kemudian dikonversi ke dalam rapat arus  $J$  (A.cm<sup>-2</sup>) melalui persamaan :

$$J = \frac{I}{2,828st} \dots\dots\dots (1)$$

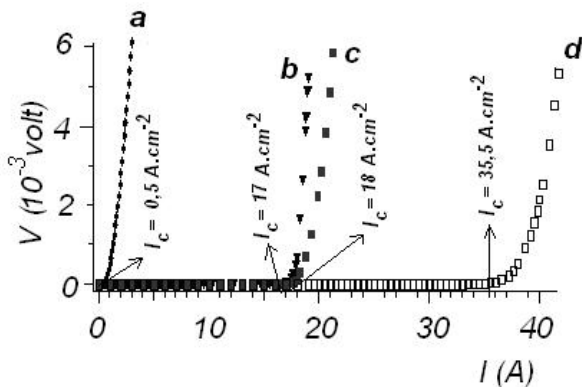
dengan  $I$  adalah arus (Amper),  $s$  dan  $t$  berturut-turut adalah 2 cm yang merupakan jarak antara *probe* (cm) dan tebal cuplikan (cm) [12]. Hasil perhitungan  $J$  (A.cm<sup>-2</sup>) untuk seluruh cuplikan dicantumkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Data  $T_c$ ,  $I_c$  dan  $J_c$  pada cuplikan hasil proses *sinter* dan pelelehan.

No	Nama Cuplikan	$T_c$ (K)	$I_c$ (Amper)	$J_c$ (A.cm <sup>-2</sup> )
1.	CSIN	92,00	0,5	3,98
2.	YM-Ag <sub>2</sub> O	91,00	17,00	135,35
3.	YM-10Ag <sub>2</sub> O	90,00	18,00	143,32
4.	YM-30Ag <sub>2</sub> O	92,00	35,50	282,64

Untuk cuplikan hasil *sinter*, CSIN nilai  $J_c$  yang diperoleh hanya  $\approx 3,98$  A.cm<sup>-2</sup> (Gambar 5a). Rendahnya nilai  $J_c$  tersebut dapat dipahami karena bahan tersebut memiliki antara lain stukturmikro yang memperlihatkan *porous* dengan konektivitas antar butir kurang baik, butiran yang terorientasi secara acak dengan bidang batas butir tidak beraturan dan tanpa impuritas (Gambar 5a).

Seperti diperlihatkan pada Gambar 5a, mula-mula tegangan tetap bernilai nol, meskipun nilai arus dinaikkan. Dalam kondisi ini bahan masih bersifat superkonduktif dan hubungan kurva  $I - V$  tidak linier. Kemudian arus terus dinaikkan sampai dengan suatu



Gambar 5. Hubungan antara I (A) terhadap V (mV) hasil pengukuran cuplikan dengan probe empat titik dari cuplikan a). CSIN, b). YM-Ag<sub>2</sub>O, c). YM-10Ag<sub>2</sub>O dan d). YM-30Ag<sub>2</sub>O

harga arus tertentu, yaitu  $I_c \approx 0,5$  A tiba-tiba muncul tegangan dan tegangan tersebut terus meningkat dengan bertambahnya arus. Pada kondisi  $I > I_c$ , hubungan kurva I -V linier (*ohmik*) dan telah berubah dan sudah tidak lagi bersifat superkonduktif.

Sebaliknya, cuplikan YM-Ag<sub>2</sub>O memiliki  $I_c$  yang jauh lebih tinggi dari  $I_c$  hasil *sinter* (Gambar 5b). Tampak bahwa kurva I - V memiliki daerah superkonduksi yang lebih lebar. Peningkatan pada harga  $I_c$  tersebut dapat disebabkan oleh antara lain (i) terbentuknya strukturmikro yang jauh lebih rapat (*dense*) dan *highly oriented grains (highly texture)* sehingga konektivitas antar butiran meningkat (ii) terbentuk fasa impuritas, seperti fasa 211 dan fasa Ag yang terdistribusi dalam *bulk*.

Dengan penambahan Ag<sub>2</sub>O nilai  $J_c$  pada cuplikan dengan substitusi Ag<sub>2</sub>O lebih besar dari nilai  $J_c$  pada cuplikan tanpa kandungan Ag<sub>2</sub>O (YM-Ag<sub>2</sub>O), seperti pada Tabel 3. Ini menunjukkan bahwa fasa Ag dalam *bulk* YBCO meningkatkan konektivitas listrik antar butir yang baik dan berperan sebagai *flux pinning centers* yang efektif. Meskipun kedua fasa tersebut adalah fasa non-superkonduksi, namun Ag adalah material konduktor sedangkan fasa 211 adalah bahan isolator. Para peneliti superkonduktor YBCO mengungkapkan bahwa kombinasi dari keduanya, yaitu dari fasa 211 dan fasa Ag dalam *bulk* YBCO berperan sebagai *flux pinning center* yang efektif dalam meningkatkan harga  $J_c$  [8-11].

## KESIMPULAN

Suhu kritis dicapai,  $T_c \approx 91$  K baik untuk superkonduktor YBCO maupun superkonduktor komposit YBCO/Ag<sub>2</sub>O dan tidak memperlihatkan perubahan yang signifikan. Hasil pengukuran dengan teknik XRD menunjukkan bahwa semua cuplikan telah mengkristal dengan baik dan merupakan bahan superkonduktor YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> (YBCO) yang berstruktur kristal ortorombik grup ruang *Pmmm* No. 47. YBCO hasil

*sinter* memperlihatkan strukturmikro yang berpori, berbutir halus dan terdistribusi random. Sebaliknya, cuplikan MMTG menunjukkan strukturmikro yang padat (*dense*) dan *highly textured* yang tersusun dari fasa YBCO berbentuk pelat berukuran panjang dan fasa Ag serta fasa 211 yang terdistribusi pada bidang batas butir YBCO. Perubahan struktur mikro yang drastik ini mengakibatkan terjadinya perubahan yang berpengaruh pada sifat listrik bahan YBCO, yakni rapat arus kritis,  $J_c$ . Harga  $J_c$  YBCO hasil *sinter* dicapai hanya sekitar 3,98 A.cm<sup>-2</sup> dan dengan substitusi Ag<sub>2</sub>O, harga  $J_c$  lebih dari dua kali lipat dari harga  $J_c$  YBCO. Peningkatan pada harga  $J_c$  tersebut menunjukkan bahwa fasa Ag dalam YBCO hasil MMTG meningkatkan konektivitas listrik dan juga berperan sebagai *flux pinning centers* yang efektif.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Ka. Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir, Kabid. Karakterisasi dan Analisis dan Kabag. Tata Usaha beserta staf yang telah membantu hingga selesainya makalah ini. Demikian pula diucapkan terima kasih kepada Ketua KPTF beserta anggota yang telah membantu hingga makalah ini selesai.

## DAFTARACUAN

- [1]. M. BARMAWI, *Deposition on HTS Thin Films, Work Shop on HTS, ITB-Bandung, 5-6 Oktober (1998)*
- [2]. ROBERT SCHWAL, *Power System-Other Application, WTEC Panel Report on Power Application of Superconductivity in Japan and Germany, Maryland-United States (1997) 57-98*
- [3]. R. D. BLAUGHER, *Power System, Generation and Storage, WTEC Panel Report on Power Application of Superconductivity in Japan and Germany, Maryland-United States (1997) 20-56*
- [4]. TETSUYA UCHIMOTO and KENZO MIYA, *Application of High-Suhue Superconductors to Enhance Nuclear Fusion Reactors, Japan, 36 (1999)92-103*
- [5]. BALLARINO A, *Proceeding of EPAC 2000, Vienna, Austria*
- [6]. MURAKAMI M, *Supercond. Sci. Technol, 5 (1992) 183-203*
- [7]. DIDIN S. WINATAPURA, WISNU ARI ADI, E. SUKIRMAN dan GRACE TJ. SULUNGBUDI, *Sintesis Superkonduktor YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> Dengan Proses Melt-Textured Growth Yang Dimodifikasi, Prosiding Pertemuan Ilmiah IPTEK Bahan'02, Serpong 22-23 Oktober (2002) 168-172*
- [8]. MASATO MURAKAMI, MITSURU MORITA, KENJI DOI and KATSUYOSHI MIAMOTO, *Journal of Applied Physics, 28 (1989) 1189-1194*

- [9]. J. JOO, J-G KIM and W. NAH, *Improvement of Mechanical Properties of YBCO-Ag Composite Superconductors Made by Mixing Metallic Ag Powder and  $AgNO_3$  Solution*, *Supercond. Sci. Technol.* **11** (1988) 645-649
- [10]. P. DIKO, G. KRABBES, and C. WENDE, *Supercond. Sci. Technol.* **14** (2000) 486-495
- [11]. A. C. ROSE-INNES, and E. H. RHODERICK, *Introduction To Superconductivity, 1<sup>st</sup> Edition*, Pergamon Press Ltd., Oxford-London (1969)
- [12]. E. SUKIRMAN, W. ARIADI, D. S. WINATAPURA dan YUSTINUS, *Majalah MESIN, Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Fakultas Teknologi Industri UNIVERSITAS TRISAKTI, **8** (2006) 79-90
- [13]. BÄRD PETER THRANE, *Status and Methods for Research on HTS*, Diskusi Ilmiah, PPSM-BATAN, Serpong 22 April (1998)
- [14]. DIDIN S. WINATAPURA, WISNU ARIADI dan E. SUKIRMAN, *Karakterisasi Superkonduktor Komposit  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  yang Disintesis dengan Metode Modified Melt-Textured Growth (MMTG)*, Prosiding Pertemuan Iptek Bahan'04, Serpong 7 September (2004) 287-292
- [15]. F. IZUMI, *The Rietveld Method*, ed. R. A. YOUNG, Oxford University Press, Oxford (1993), Chapter 13
- [16]. WISNU ARIADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA dan GRACE TJ. SULUNGBUDI, *Majalah Batan*, XXXIV 1/2 Januari/April (2001), 15-25
- [17]. JIN S, TIEFEL T. H, SHERWOOD R. C, DAVIS M. E, and KIETH H. D, *Critical Current in Y-Ba-Cu-O Superconductors*, *Appl. Phys. Lett.*, 52 (1988) 2074 -2076
- [18]. DARMINTO, *Efek Doping Oksigen dan Substitusi Pb pada Struktur dan Dinamika Vorteks dari Kristal Tunggal Superkonduktor  $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$*  Desertasi untuk memperoleh gelar Doktor, Institut Teknologi Bandung (2001)