

## PENGARUH WAKTU PELELEHAN TERHADAP RAPAT ARUS KRITIS SUPERKONDUKTOR $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

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

Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN) - BATAN

Kawasan Puspiptek Serpong 15314, Tangerang

### ABSTRAK

**PENGARUH WAKTU PELELEHAN TERHADAP RAPAT ARUS KRITIS SUPERKONDUKTOR  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ .** Sintesis superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO) melalui metode *modified melt-textured growth* (MMTG) dengan waktu pelelehan berbeda telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan waktu pelelehan yang optimal pada superkonduktor YBCO dengan nilai rapat arus kritis ( $J_c$ ) yang tinggi melalui proses pelelehan dengan metode MMTG dan mendapatkan informasi yang mempengaruhi nilai  $J_c$  tersebut. Proses pelelehan cuplikan dilakukan pada suhu 1100°C selama 1 menit, 6 menit dan 18 menit, kemudian diturunkan dengan cepat ke suhu 1000°C dan diikuti dengan penurunan lambat ke suhu 960°C. Sifat listrik cuplikan dikarakterisasi dengan *probe* empat titik dan kualitas serta kuantitas fasa-fasa di dalam cuplikan diukur dengan teknik difraksi sinar-x (XRD) dan dianalisis dengan metode *Rietveld*. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa cuplikan MMTG merupakan bahan superkonduktor YBCO yang berstruktur kristal ortorombik dengan parameter kisi  $a = 3,886(5) \text{ \AA}$ ,  $b = 3,821(7) \text{ \AA}$  dan  $c = 11,691(2) \text{ \AA}$  dan grup ruang Pmmm No. 47. Suhu kritis baik cuplikan *sinter* maupun MMTG tidak memperlihatkan perubahan nilai yang signifikan dan diperoleh berturut-turut,  $T_c \sim 92 \text{ K}$  dan  $91 \text{ K}$ . Nilai  $J_c$  untuk cuplikan YSIN, YM-1, YM-6 dan YM-18 diperoleh berturut-turut  $97,37 \text{ A.cm}^{-2}$ ;  $118,55 \text{ A.cm}^{-2}$  dan  $93,63 \text{ A.cm}^{-2}$ .

**Kata kunci :** Superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , proses pelelehan, rapat arus kritis

### ABSTRACT

**THE MELTING TIME EFFECT TO THE CRITICAL CURRENT DENSITY OF  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  SUPERCONDUCTOR.** Synthesis of  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO) superconductor using modified melt-textured growth (MMTG) method with different melting time has been done. The aim of this research is to obtain the optimal melt time on the YBCO superconductor having high critical current density ( $J_c$ ) by MMTG method, and information which influenced the  $J_c$  value. The MMTG process was done at 1100°C during 1, 6, and 18 minutes then cooled rapidly to 1000°C followed by slow cooling to 960°C. The electrical property of the specimen was characterized with four point probe, and the quality also the quantity of the phase inside the specimen was measured by x-rays diffraction (XRD) technique, and was analyzed by *Rietveld* method. The result showed that the MMTG specimens were YBCO superconductor, having orthorhombic crystal structure with lattice parameter of  $a = 3,886(5) \text{ \AA}$ ,  $b = 3,821(7) \text{ \AA}$  and  $c = 11,691(2) \text{ \AA}$ , and space group Pmmm No. 47. The critical temperature neither sinter nor MMTG specimens did not show the significant change, and obtained of  $T_c$  about 91 K and 92 K respectively. The value of for YSIN, YM-1, YM-6 and YM-18 specimens were obtained of 97,37; 118,55 dan 93,63  $\text{A.cm}^{-2}$  respectively.

**Key words :**  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  superconductor, melt processing, critical current density

### PENDAHULUAN

Superkonduktor suhu tinggi (SKST) merupakan bahan oksida atau keramik yang berinduk pada senyawa kuprat (Cu-O) dengan komposisi kimia yang multikomponen, sehingga bahan ini bersifat *multiphase*, memiliki struktur kristal berlapis atau derajat anisotropi ( $\gamma^2$ ) yang tinggi dan panjang koherensi ( $\xi$ ) yang pendek. Akibatnya, bahan ini tidak mudah disintesis dalam bentuk murni dan mudah diganggu efek fluktuasi termal karena  $T_c$  yang tinggi dan  $\xi$  yang pendek. Namun demikian, bahan SKST ini telah diaplikasikan secara 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]. Salah satu bahan SKST yang telah banyak di kaji dan memiliki anisotropi tinggi yang akan dibahas dalam paper ini adalah senyawa YBCO. Parameter penting pada aplikasi bahan superkonduktor dalam berbagai industri adalah harga rapat arus kritis,  $J_c$  yang tinggi.

Proses preparasi cuplikan *bulk* YBCO dengan metode MMTG telah diuraikan secara lengkap dalam makalah terdahulu [6,7] yang mana *bulk* YBCO hasil *sinter* dipanaskan pada suhu 1.100 °C, diikuti pendinginan cepat ke suhu sekitar 1.000 °C dan didinginkan dengan lambat ke suhu 960 °C. Butir-butir YBCO hasil proses pelelehan tersebut terorientasi ke suatu arah (bertekstur) dan memiliki  $J_c$  jauh lebih tinggi dari  $J_c$  hasil *sinter* pada kondisi 77 K dalam medan magnet nol. Pada penelitian sebelumnya hasil pengukuran menggunakan peralatan *Superconducting Quantum Interference Device* (SQUID) di Jepang, diperoleh harga rapat arus kritis pada *bulk* YBCO hasil MMTG,  $J_c \approx 10^3$  A.cm<sup>-2</sup> [8,9]. Namun demikian hasil tersebut belum optimal, karena aplikasi dalam industri menghendaki persyaratan dengan harga  $J_c \approx 10^4$  A.cm<sup>-2</sup> [10]. Beberapa parameter yang mempengaruhi  $J_c$  antara lain *grain alignment* dan kandungan impuritas seperti fasa 211 yang berperan sebagai pusat jepitan fluks [10].

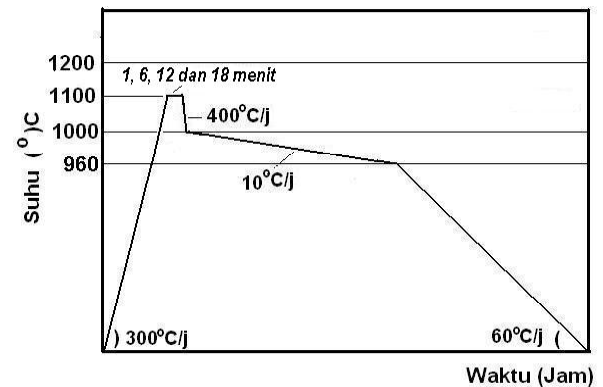
Bahan superkonduktor hasil *sinter* memiliki struktur mikro yang terorientasi acak, porositas cukup tinggi dan butiran yang terpotong-potong berukuran kecil ( $\ll 10 \mu\text{m}$ ). Kehadiran porositas kemungkinan disebabkan oleh *insufficient densification* atau terbentuknya *microcracks* atau terbentuknya *stress concentration* dekat batas butir selama proses *thermal expansion* [4,10]. Masalah ini menyebabkan konektivitas listrik antar butir menjadi kurang baik, sehingga menghasilkan harga  $J_c$  yang rendah. Proses MMTG dapat menghasilkan struktur mikro yang rapat (*dense*) dan *highly textured* dengan butiran tersusun secara *unidirectional*, sehingga dapat memberikan konektivitas listrik antar butir yang jauh lebih baik dari pada YBCO hasil *sinter*.

Pada bidang batas butir YBCO diendapkan fasa 211 yang berperan sebagai *flux pinning center* [10] yang diyakini berperan penting dalam peningkatan  $J_c$ . Jumlah fraksi massa dan ukuran fasa 211 yang terperangkap dalam matriks YBCO berpengaruh terhadap tinggi/rendahnya harga  $J_c$  yang dihasilkan. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan proses MMTG dengan waktu pelelehan yang bervariasi untuk waktu 1 menit, 6 menit dan 18 menit diharapkan diperoleh fraksi massa fasa 211 yang optimum sedemikian rupa sehingga diperoleh nilai  $J_c$  tinggi. Disamping itu juga diharapkan dapat diperoleh informasi yang mempengaruhi proses pelelehan tersebut.

Makalah ini dibatasi pada pembuatan superkonduktor YBCO melalui proses *sinter* dengan metode reaksi padatan (*solid state reaction*) dan proses pelelehan metode MMTG dengan waktu pelelehan bervariasi serta karakterisasi cuplikan yang meliputi efek *Meissner*, struktur kristal dengan teknik XRD yang dianalisis dengan metode *Rietveld* dan sifat listrik dengan metode *probe* empat titik.

## METODE PERCOBAAN

Dalam penelitian ini disiapkan cuplikan superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO) dengan metode reaksi padatan yakni suatu proses yang terdiri dari urutan kegiatan penimbangan unsur penyusun ( $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ , dan  $CuO$ ), pencampuran, kalsinasi dan *sintering*. Dari proses *sinter* diperoleh superkonduktor YBCO dinamai cuplikan YSIN. Proses pelelehan YBCO dilakukan berdasarkan ilustrasi skematis Gambar 1. Cuplikan YBCO hasil proses *sinter* dipanaskan di dalam tungku (*Thermolyne F48050-26*) sampai suhu 1.100 °C kemudian ditahan selama 1 menit, 6 menit dan 18 menit (dari proses ini diperoleh cuplikan YM-1, YM-6 dan YM-18) dan diturunkan dengan cepat ke suhu 1.000 °C, diikuti pendinginan lambat ke suhu 960 °C.



Gambar 1. Gambar alir proses pelelehan  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  dengan metode MMTG untuk waktu pelelehan selama 1 menit, 6 menit dan 18 menit.

Pengukuran  $J_c$  dan  $T_c$  cuplikan menggunakan peralatan *probe* empat titik. Peralatan ini terdiri dari tiga komponen utama, yaitu sensor suhu, sumber arus, sumber tegangan dan perangkat komputer. Ketiga peralatan tersebut dihubungkan dengan perangkat komputer sehingga pengukuran juga dapat dikontrol melalui komputer. Dalam pengukuran ini, pada cuplikan ditanamkan kawat Al sehingga listrik dapat mengalir langsung ke dalam cuplikan. Dalam pengukuran  $I_c$ , arus listrik *dc* dinaikkan mulai dari harga 0,01 Amper dan perubahan tegangan yang tercatat. Hasilnya diperoleh kurva  $I$  (Amper)- $V$  (volt). Sedangkan pada pengukuran  $T_c$ , arus listrik ditetapkan konstan dan suhu  $T$  yang diturunkan. Seluruh rangkaian pengukuran tersebut dilakukan pada kondisi nitrogen cair. Pada pengukuran ini, arus kritis maksimum yang dapat dicapai sampai orde  $10^2$  Amper, berbeda dengan pengukuran dengan alat *Superconducting Quantum Interference Device* (SQUID) yang mampu menghasilkan (rapat) arus kritis sampai orde  $10^6$  Amper [10].

Pengukuran pola difraksi cuplikan dilakukan dengan berkas sinar-x dari target = Cu (panjang gelombang,  $\lambda = 1,540 \text{ \AA}$ ), filter = Ni, arus = 30 mA, tegangan = 30 kV, mode = *step-scan*, lebar langkah = 0,05°, *preset time* = 1 detik dan daerah sudut

pengukuran = 20° - 50°. Data difraksi sinar-X kemudian dianalisis dengan bantuan program *Rietveld analysis*. Program komputer ini memerlukan dua macam data masukan, yakni pasangan data intensitas (cacahan) hasil pengamatan terhadap sudut hamburan dan parameter *least squares*.

Dalam metode tersebut, *least square fit* dilakukan *point by point* terhadap keseluruhan pola difraksi yang diperoleh dari suatu campuran *multiphase*. Analisis struktur kristal dengan metode *Rietveld* ini dilakukan dengan mencocokkan data pola difraksi pengukuran dengan data pola difraksi yang diperoleh dengan mengasumsikan suatu model fasa tertentu. Tingkat kecocokkan antara data pengamatan dengan model ditunjukkan oleh harga *ratio weight pattern* ( $R_{wp}$ ) atau faktor reabilitas yang dirumuskan sebagai:

$$R_{wp} = \left[ \frac{\sum_i W_i [Y_i(0) - Y_i(c)]^2}{\sum_i W_i [Y_i(0)]^2} \right] \dots\dots\dots (4)$$

dengan  $Y_i(0)$  : data intensitas difraksi hasil pengamatan untuk step ke-i,  $Y_i(c)$ : data intensitas difraksi hasil perhitungan ke-i dan  $W_i$ : faktor berat (weight) data ke-i,  $1/Y_i(0)$ . Semakin kecil harga faktor ini, menunjukkan semakin sesuainya model yang diasumsikan dengan struktur kristal bahan yang diamati. Jika terdapat lebih dari satu fasa, asumsi model dibuat untuk berbagai fasa yang mungkin terjadi dengan masing-masing fasa sebagai parameter yang di-*refined*. Dengan metode ini juga dapat diperoleh jumlah fraksi massa fasa dan parameter kisinya [11].

Jumlah fraksi fasa dan dimensi ukuran fasa berpengaruh terhadap nilai rapat arus,  $J$  yang diperoleh. Dari hasil pengukuran dengan probe empat titik, besarnya nilai  $J$  dapat dikonversi dari data perubahan tegangan,  $V$  (Volt) terhadap arus,  $I$  (Amper) melalui persamaan :

$$J = \frac{I}{3,14s.t} \dots\dots\dots (3)$$

dengan  $I$ ,  $s$  dan  $t$  berturut-turut adalah arus (A), jarak antar *probe* (cm) dan tebal cuplikan *bulk* (cm) [12].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian efek *Meissner-Ochsenfeld* pada suhu nitrogen cair menunjukkan bahwa semua cuplikan memperlihatkan fenomena superkonduktivitas, yakni melayang di atas permukaan magnet permanent *SmCo*. Pada keadaan tersebut cuplikan bersifat diamagnetik sempurna atau dengan kata lain ketiga cuplikan merupakan bahan superkonduktor.

Gambar 2 memperlihatkan hasil *refinement* pola difraksi sinar-x dari cuplikan hasil *sinter* dan *MMTG* untuk waktu pelelehan yang bervariasi dengan metode analisis *Rietveld*. Dari hasil pengukuran terlihat bahan telah mengkristal dengan baik yang dicirikan oleh puncak-puncak intensitas difraksi yang tajam. Untuk

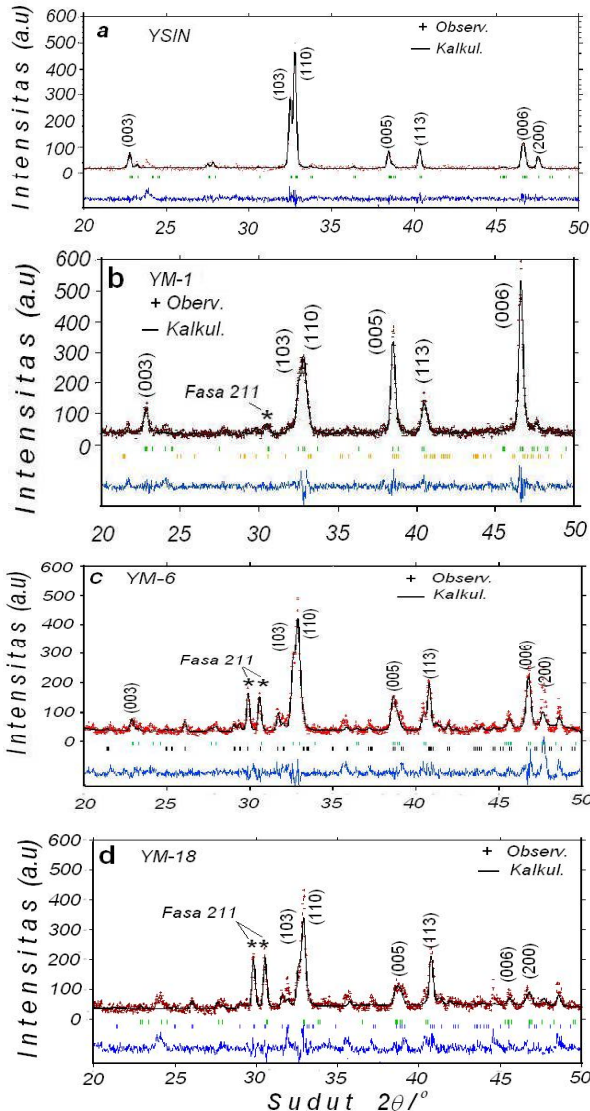
cuplikan *sinter* (*YSIN*) diperoleh faktor  $R_{wp} = 6,14$  dan untuk cuplikan *MMTG* yaitu *YM-1*, *YM-6* dan *YM-18* berturut-turut diperoleh faktor  $R_{wp} = 25,45$ ; 27,26 dan 20,64. Besarnya harga  $R_{wp}$  pada hasil pelelehan kemungkinan disebabkan antara lain adanya puncak-puncak yang tidak berimpit dengan profil pola difraksi fasa *YBCO*, adanya puncak yang tidak terkalkulasi dan *ratio peak to back ground* cukup tinggi. Parameter kisi seluruh cuplikan hasil *sinter* dan *MMTG* tidak mencirikan perubahan yang signifikan dengan  $a = 3,886(5) \text{ \AA}$ ,  $b = 3,821(7) \text{ \AA}$  dan  $c = 11,691(2) \text{ \AA}$ . Ini berarti bahwa cuplikan merupakan bahan superkonduktor *YBCO* yang berstruktur kristal ortorombik dan grup ruang *Pmmm* no. 47.

Suhu dimana resistivitas bahan  $\rho \approx 0 \Omega.cm$  disebut suhu transisi kritis  $T_c$ . Hasil pengukuran  $T_c$  seluruh cuplikan dengan probe empat titik ditunjukkan pada Gambar 3, yaitu kurva antara resistivitas,  $\rho$  ( $\Omega.cm$ ) vs. Suhu ( $K$ ). Seperti ditunjukkan pada Gambar 4, tampak kelima cuplikan menampilkan nilai  $T_c$  (nol) yang hampir sama. Nilai  $T_c$  dicantumkan dalam Tabel 1.  $T_c$  (nol) adalah nilai  $T_c$  dengan nilai resistivitas nol. Hal ini karena  $T_c$  merupakan besaran intrinsik, artinya bahwa nilai  $T_c$  tidak akan mengalami perubahan nilai yang *significant* baik hasil proses *sinter* maupun hasil *MMTG*. Suhu transisi onset cuplikan hasil *sinter*,  $T_{c,on} \sim 98 \text{ K}$  sedangkan cuplikan *MMTG* menampilkan  $T_{c,on} \sim 91 \text{ K}$ . Dari hasil pengukuran kedua jenis cuplikan tersebut tampak memiliki suhu kritis onset ( $T_{c,on}$ ) yang berbeda. Namun sampai saat ini belum diketahui dengan jelas mengenai mekanisme perbesaan  $T_{c,on}$  tersebut.

Gambar 4 menunjukkan kurva antara  $V$  (volt) terhadap  $I$  (Amper) hasil pengukuran dengan probe empat titik. Dari kurva tersebut diperoleh nilai arus kritis,  $I_c$  (Amper) kemudian dimasukkan ke dalam persamaan (5) sehingga diperoleh nilai rapat arus kritis,  $J_c$ . Hasil perhitungan dicantumkan dalam Tabel 1. Tampak bahwa harga  $I_c/J_c$  dari kelima cuplikan sangat bervariasi, yang mana harga  $J_c$  hasil *sinter* masih jauh lebih rendah dari harga  $J_c$  hasil *MMTG*. Ini menunjukkan bahwa  $J_c$  bukan besaran intrinsik dan oleh karena itu dapat dinaikkan melalui proses pengontrolan suhu.

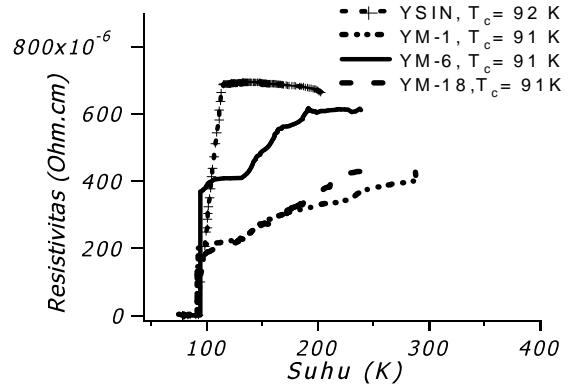
Dalam eksperimen ini  $J_c$  ditentukan menggunakan kriteria tegangan terendah  $V_c \approx 0,001$  volt, artinya  $J_c$  cuplikan dicatat pada saat  $V \geq 0,001$  volt. Seperti diperlihatkan pada Gambar 4, mula-mula tegangan tetap sekitar nol volt, meskipun arus pada bahan dinaikkan. Dalam kondisi ini bahan bersifat superkonduktif. Namun ketika arus terus dinaikkan, maka pada suatu harga arus tertentu  $I_c$ , tiba-tiba muncul tegangan dan tegangan itu meningkat tajam dengan kenaikan arus selanjutnya. Pada kondisi ini, bahan telah beralih dari keadaan superkonduktif menjadi bahan normal, yang ditunjukkan oleh hubungan kurva  $I-V$  linier (*Ohmik*). Hasil pengukuran arus kritis dengan probe empat titik untuk cuplikan *YSIN*, *YM-1*, *YM-6* dan *YM-18* dicantumkan dalam Tabel 1. Tampak bahwa cuplikan hasil *sinter* (*YSIN*)

memiliki arus kritis yang masih rendah, yaitu  $I_c \sim 0,5$  A ( $J_c \sim 3,98$  A.cm<sup>-2</sup>) dan arus kritis tertinggi dihasilkan oleh cuplikan YM-6, dengan  $I_c \sim 12,81$  Amper ( $J_c \sim 101,99$  A.cm<sup>-2</sup>). Namun demikian nilai tersebut masih belum optimum untuk aplikasi pada industri, yang menghendaki persyaratan  $J_c \sim 10^4$  A.cm<sup>-2</sup> (pengukuran dilakukan dengan menggunakan peralatan *Superconducting Quantum Interference Device*).

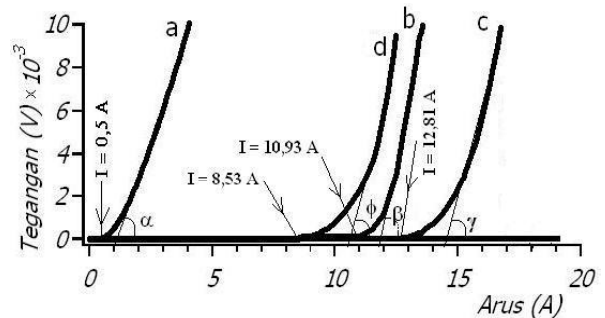


Gambar 2. Profil pola difraksi sinar-x hasil refinement dengan analisis *Rietveld* dari cuplikan a). YSIN, b). YM-1, c). YM-6 dan d). YM-18

Rendahnya  $J_c \sim 3,98$  A.cm<sup>-2</sup> pada cuplikan hasil sinter menurut Murakami dkk. [10,13] disebabkan oleh fenomena *weak link* antara lain anisotropi yang tinggi pada konduktivitas menyebabkan *weak connection* antar butir dan adanya porositas oleh sebab *insufficient densification*, konsentrasi *stress* dan *microcrack*. Melalui proses *MMTG*, nilai  $J_c$  meningkat drastis menjadi sekitar  $\sim 101,99$  A.cm<sup>-2</sup>. Peningkatan tersebut disebabkan antara lain oleh terbentuknya fasa 211 yang terdistribusi pada *grain boundary* YBCO yang diyakini berperan



Gambar 3. Grafik hubungan antara resistivitas,  $r$  (W.cm) terhadap suhu,  $T$  (K) pada superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  hasil sinter dan *MMTG*.

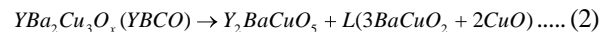


Gambar 4. Kurva antara  $V$  (volt) terhadap  $I$  (Amper) hasil pengukuran dengan *probe* empat titik dari superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  dari cuplikan a). YSIN, b). YM-1, c). YM-6 dan d). YM-18.

Tabel 1. Hasil pengukuran  $T_c$ ,  $I_c$  dan  $J_c$  pada cuplikan hasil sinter dan pelehan pada suhu 77 K dan medan magnet nol.

No.	Cuplikan	$T_c$ (K)	$I_c$ (A)	$J_c$ (A.cm <sup>-2</sup> )
1.	YSIN	92	0,5	3,98
2.	YM-1	91	10,93	87,02
3.	YM-6	91	12,81	101,99
4.	YM-18	91	8,53	67,91

sebagai *flux pinning centers* dan struktur mikro yang *highly textured* menuju ke satu arah tertentu.

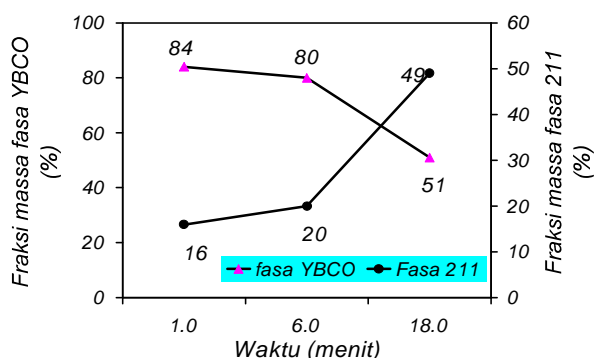


dengan  $Y_2BaCuO_5$  (211) dan  $L(3BaCuO_2 + 2CuO)$  berturut-turut adalah fasa padat dan *liquid*. Reaksi ini terjadi pada suhu sekitar 1.100 °C dan kemudian diturunkan dengan cepat ke suhu sekitar 1.000 °C (suhu peritektik) untuk menghindari fasa 211 tumbuh kontinyu [10].

Pada reaksi balik atau reaksi penggabungan kembali (rekombinasi) fasa padatan  $Y_2BaCuO_5$  (211) dan fasa *liquid*  $L(3BaCuO_2 + 2CuO)$  membentuk fasa  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO) berlangsung melalui proses nukleasi (*nucleation*) dan pertumbuhan (*growth*). Kondisi ini berlangsung selama proses solidifikasi, yaitu

proses pendinginan lambat dari suhu 1.000 °C ke suhu 960 °C dengan *cooling rate* sekitar 10 °C/jam (seperti ditunjukkan pada Gambar 1). Lamanya waktu pelelehan menentukan sejumlah fasa *liquid* yang terbentuk dan fasa 211, yang mana sebagian fasa *liquid* ini diserap (*absorbed*) oleh fasa *absorbents* 211 [14]. Pada kondisi reaksi balik tersebut terjadi ketidak setimbangan komposisi kimia. Ini berarti bahwa terdapat fasa 211 yang tidak berpasangan dengan fasa *liquid*, sehingga akan terus tumbuh dan kemudian diendapkan pada matriks YBCO.

Dengan meningkatnya waktu pelelehan sampai 18 menit, fraksi massa fasa 211 bertambah lebih dari dua kali lipat dari waktu pelelehan untuk 1 menit dan 6 menit, seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Sebaliknya, fasa YBCO turun dengan naiknya waktu pelelehan. Ini menunjukkan bahwa cuplikan Y-18 dengan persentase fraksi massa fasa 211 sekitar 49% menghasilkan  $J_c$  lebih kecil dari cuplikan YM-1 dan YM-6 dengan fraksi massa fasa 211 berturut-turut 16 % dan 20 %, seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik antara fraksi massa fasa 211 dan YBCO terhadap waktu pelelehan yang analisis dengan metode Rietveld pada  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  hasil MMTG

Rendahnya harga  $J_c$  pada cuplikan YM-18 kemungkinan disebabkan antara lain; (i). Kemungkinan adanya fasa 211 yang terperangkap dalam matriks YBCO dengan dimensi ukuran butir besar, (umumnya  $\gg 15 \mu m$ ) dan terdistribusi tidak homogen dengan menghasilkan konektivitas listrik lemah terhadap fasa superkonduksi, sehingga nilai  $J_c$  rendah [10,15]. (ii). Dengan meningkatnya waktu pelelehan, maka semakin banyak fasa *liquid* yang terbentuk dan dengan demikian lebih banyak fasa *liquid* yang akan tersedia untuk proses rekombinasi dengan fasa 211. Untuk memperkecil pertumbuhan fasa 211, maka kecepatan pendinginan (*cooling rate*) harus diturunkan, agar memberikan cukup waktu bagi berlangsungnya proses rekombinasi. Hal ini karena *cooling rate* yang digunakan dalam suatu rangkaian proses pelelehan, menyatakan waktu yang tersedia untuk proses rekombinasi fasa *liquid* dengan fasa 211 dalam pembentukan fasa YBCO. Hasil penelitian terdahulu mengungkapkan bahwa waktu pelelehan dan kecepatan pendinginan sangat berpengaruh terhadap pembentukan struktur mikro dan

dengan demikian berpengaruh terhadap sifat-sifat superkonduksi [16].

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini diperoleh bahwa cuplikan hasil sinter dan MMTG telah mengkristal dengan baik dan membentuk bahan superkonduktor YBCO berstruktur kristal ortorombik dengan parameter kisi  $a = 3,820 \text{ \AA}$ ;  $b = 3,897 \text{ \AA}$  dan  $c = 11,686 \text{ \AA}$  grup ruang Pmmm no. 47. Harga suhu kritis cuplikan sinter dan MMTG diperoleh berturut-turut  $T_c \sim 91 \text{ K}$  dan  $92 \text{ K}$  dan tidak memperlihatkan perubahan yang signifikan. Persentase fraksi massa fasa  $Y_2BaCuO_5$  (211) sebagai konsekuensi dari proses pelelehan YBCO meningkat dengan bertambahnya waktu pelelehan dan harga  $J_c$  tertinggi diperoleh dari cuplikan YM-6 yakni sekitar  $118,55 \text{ A.cm}^{-2}$ . Namun demikian harga  $J_c$  yang dihasilkan masih belum cukup tinggi untuk dapat diaplikasikan dalam industri yang menghendaki .

## DAFTARACUAN

- [1]. ROBERT SCHWAL, Power System-Other Application, WTEC Panel Report on Power Application of Superconductivity in Japan and Germany, Maryland-United States (1997) 57-98
- [2]. 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
- [3]. TETSUYA UCHIMOTO and KENZO MIYA, Application of High - Temperature Superconductors to Enhance Nuclear Fusion Reactors, Japan, **36** (1999), 92-103
- [4]. M. BARMAWI, Deposition on HTS Thin Films, Work Shop on HTS, ITB-Bandung, 5-6 Oktober (1998)
- [5]. BALLARINO A, Proceeding of EPAC, Vienna, Austria, (2000)
- [6]. E. SUKIRMAN dkk, Peragaan Fenomena Superkonduktivitas untuk SMU dan Universitas, Petunjuk Pelaksanaan, (2000)
- [7]. DIDIN S. WINATAPURA dan WISNU A. ADI, Jurnal Sains Materi Indonesia, **1** (2000) 21-26
- [8]. WISNU ARI ADI, E. SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA, GRACE TJ. S., RIFAI M., dan RIDWAN, Jurnal Sains Materi Indonesia, (Indonesian Journal of Materials Science), **3** (3) (2002)9-14
- [9]. MURAKAMI M, Supercond. Sci. Technol, **5** (1992) 183-203
- [10]. F. IZUMI, The Rietveld Method, Ed. R. A. YOUNG, Oxford University Press, Oxford Chapter 13 (1993)
- [11]. E. SUKIRMAN, WISNU ARI ADI dan SALMAH, Majalah BATAN, **XXXIII** (1/2), Januari/April (2000)

- [12]. JIN S, TIEFEL T. H, SHERWOOD R. C, DAVIS M. E, and KIETH H. D, *Appl. Phys. Lett.*, **52** (1988) 2074-2076
- [13]. SALAMA K, SATHYAMURTHY S, *Supercond. Sci. Technol.* **11**(1998)954-958
- [14]. FANG MINGHU, HU GANGJIN, CAIMENG, JIAO ZHENKUAN and HANGZHOU, *Solid State Communications*, **89** (1994) 93-95
- [15]. MURAKAMI M, GOTOH S, FUJIMOTO H, YAMAGUCHI K, KHOSHIZUKAN, and TANAKA S, *Supercond. Sci. Technol.*, **4** (1993) S43