

KARAKTERISASI SUPERKONDUKTOR KOMPOSIT $YBa_2Cu_3O_{7-x}-Y_2BaCuO_5$ YANG DISINTESIS DENGAN METODE MODIFIED MELT-TEXTURED GROWTH (MMTG)

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

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

ABSTRAK

KARAKTERISASI SUPERKONDUKTOR KOMPOSIT $YBa_2Cu_3O_{7-x}-Y_2BaCuO_5$ YANG DISINTESIS DENGAN METODE MODIFIED MELT-TEXTURED GROWTH (MMTG). Pembuatan superkonduktor komposit $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (fasa 123)- Y_2BaCuO_5 (fasa 211) dengan metode *modified melt-textured growth* (MMTG) telah dilakukan. Pembuatan cuplikan dilakukan dengan cara mencampurkan 0, 10, 15 dan 20% berat fasa 211 ke dalam matriks fasa 123, sehingga diperoleh berturut-turut empat buah cuplikan SKK-0, SKK-10, SKK-15 dan SKK-20. Keempat cuplikan tersebut kemudian dilelehkan dengan metode MMTG. Kuantitas dan kualitas fasa di dalam cuplikan diukur dengan teknik difraksi sinar-x (XRD) yang kemudian dianalisis dengan metode *Rietveld*. Struktur mikro cuplikan diamati dengan *scanning electron microscope* (SEM) dan *electron dispersion x-rays* (EDX). Hasil analisis menunjukkan bahwa semua cuplikan telah mengkristal dengan baik yang dicirikan oleh puncak intensitas yang tajam, dan tersusun dari fasa 123 dan fasa 211. Pada cuplikan SKK-0, puncak-puncak difraksi didominasi oleh fasa 123 dengan fraksi massa 79,08 persen. Sedangkan pada cuplikan SKK-10, SKK-15 dan SKK-20 puncak-puncak yang teramati didominasi oleh fasa 211 dengan fraksi massa berturut-turut 17,66; 16,27 dan 15,04 persen. Parameter kisi untuk fasa 123 dan fasa 211 diperoleh dengan ketelitian hingga empat angka dibelakang koma. Cuplikan hasil *sinter* menunjukkan struktur mikro yang terorientasi secara acak, berbutir halus dan porositas tinggi. Sebaliknya, pada cuplikan hasil pelelehan memperlihatkan struktur mikro dengan butir berukuran panjang berbentuk seperti pelat yang tersusun ke satu arah. Butiran tersebut diidentifikasi sebagai fasa 123, sedangkan partikel yang tertanam dalam matriks fasa 123 diketahui sebagai fasa 211. Besarnya ukuran partikel 211 yang tersebar di dalam matriks fasa 123 erat kaitannya dengan proses perlakuan panas yang diberikan.

Kata kunci : Superkonduktor komposit, MMTG, struktur mikro yang terorientasi, partikel 211

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF $YBa_2Cu_3O_{7-x}-Y_2BaCuO_5$ COMPOSITE SUPERKONDUKTOR SYNTHESIZED BY MODIFIED MELT-TEXTURED GROWTH (MMTG) METHOD. Synthesis of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (123 phase)- Y_2BaCuO_5 (211 phase) using modified melt-textured growth (MMTG) has been done. Synthesis of the specimens was formed by mixing 0, 10, 15, and 20 weight percent of 211 phases into 123 phase matrix, and obtained four specimens SKK-0, SKK-10, SKK-15, and SKK-20 respectively. Then, those were melted with MMTG method. Quality and quantity of phases inside the specimens were measured by means of x-rays diffraction technique, and then analyzed by Rietveld method. The microstructures of specimens were observed by scanning electron microscope (SEM) and electron dispersion x-rays (EDX). The result showed that all the specimens have crystallized well which was characterized by sharply diffraction pattern, and consisted of 211 and 123 phases. On the SKK-0 specimen, the diffraction peaks was dominated by 123 phases with mass fraction of 79.08 percent. Where as on SKK-10, SKK-15, and SKK-20 specimens the diffraction peaks was dominated by 211 phases with mass fraction of 17.66, 16.27 and 15.04 percent respectively. The lattice parameter for both of 123 and 211 phases were obtained by accuracy of four decimals. The sintered specimen exhibits randomly oriented microstructure, fine-grained and high porosities. By contrast, melted specimen showed the microstructure with long grains of plate shape oriented unidirectional. The plate shape grains were identified as 123 phases while the embedded particles in 123 phases matrix was known to be 211 phases. The large dimension of 211 phases which was distributed in 123 phases, related to the heat treatment process.

Key words: Composite superconductor, MMTG, oriented microstructure, 211 particles

PENDAHULUAN

Lemahnya kontak antar butiran (*weak link*) pada superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (fasa 123) hasil sinter, telah dapat diatasi melalui proses pelelehan dengan metode *modified melt-textured growth* (MMTG). Pada proses pelelehan ini, fasa 123 hasil sinter dilelehkan selama

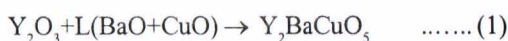
periode waktu tertentu dan didinginkan dengan cepat ke suhu peritektik yang kemudian diikuti dengan pendinginan lambat. Orientasi yang disiapkan (*preferred orientation*) selama penumbuhan butir adalah pada bidang CuO, yaitu \perp bidang (001) atau sejajar bidang

(110) jadi butir-butirnya juga diorientasikan sepanjang arah ini [1,2]. Strukturmikro yang terbentuk merupakan butiran-butiran yang *highly textured* pada matriks fasa 123. Strukturmikro ini tersusun dari matriks fasa 123 dan inklusi fasa 211 berukuran lebih kecil dari 5 mm yang terdistribusi secara acak di dalam matriks fasa 123. Berbeda dengan strukturmikro fasa 123 hasil sinter yang tersusun dari strukturmikro berbentuk pelat yang saling bertumpang tindih dan memiliki porositas tinggi. Bahan dengan strukturmikro seperti ini memiliki kontak antar butiran kurang baik dan sifat konduksinya pun jauh lebih rendah dari pada hasil proses pelelehan. Oleh karena itu, untuk aplikasi dalam dunia industri seperti *superconducting flywheel*, *superconducting bearings*, dan *superconducting fault current limiter (SFCL) bulk* hasil proses pelelehan sangat diprioritaskan.

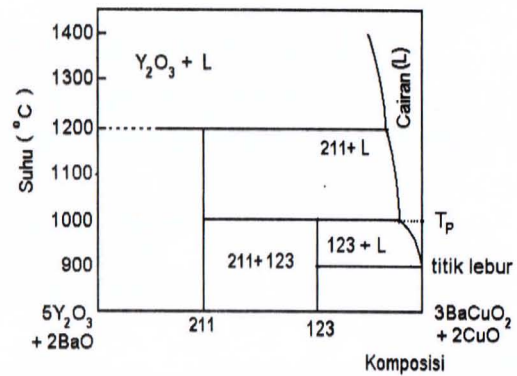
Kandungan fasa 211 yang terdistribusi di dalam bahan 123 hasil pelehan dengan MMTG masih sangat sedikit, yaitu kurang dari 15 persen [1]. Padahal fasa 211 merupakan pusat-pusat jepitan fluks (*flux pinning center*) yang sangat efektif dalam meningkatkan rapat arus kritis, J_c dari bahan 123. Oleh karena itu dalam penelitian ini fasa 211 disubstitusikan dengan kandungan yang berlainan agar tersebar dengan kerapatan tinggi, sehingga diperoleh kandungan fasa 211 di dalam matriks 123 yang optimum. Dalam proses pelelehan, penurunan suhu dengan cepat dari 1100°C (suhu pelelehan) ke suhu 1000°C (suhu peritektik) dilakukan agar fasa 211 terdispersi di dalam matriks 123 memiliki dimensi ukuran butir kurang dari 5 mm [1], sehingga pada saat pendinginan lambat ke suhu 900°C diharapkan terjadi nukleasi fasa 123 dari fasa cair (L). Dengan cara tersebut diharapkan akan terbentuk fasa 211 yang berdimensi sekecil dan sehomogen mungkin untuk meneruskan pertumbuhan butiran fasa 123.

TEORI

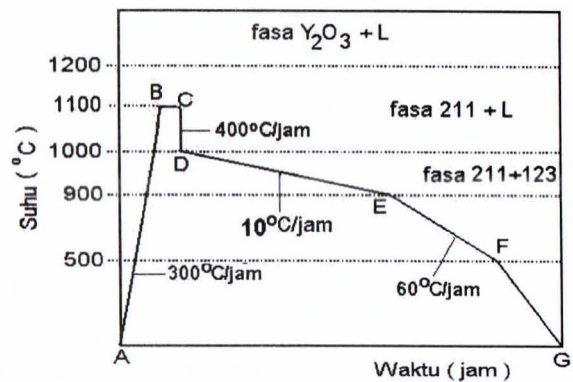
Dalam pembuatan superkonduktor fasa 123 melalui proses pelelehan dengan metode *modified melt-textured growth* (MMTG), mengacu pada diagram fasa *pseudobinari* sistem fasa 123, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Terdapat dua jenis reaksi peritektik dalam superkonduktor sistem fasa 123. Pada suhu tinggi diatas 1200°C, struktur tersusun dari fasa Y_2O_3 + cair L (L adalah campuran BaO dan CuO) adalah stabil, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pada saat pendinginan hingga suhu 1100°C, kedua fasa tersebut bereaksi secara peritektik menghasilkan fasa 211 dengan reaksi kimia sebagai berikut:



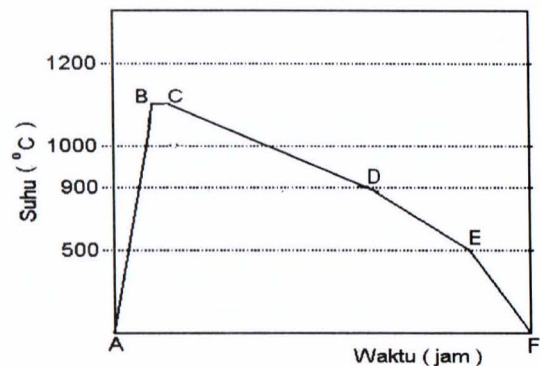
Pada daerah suhu 1100°C merupakan proses dekomposisi dan pelelehan, dan strukturnya terdiri dari fasa 211 dan cairan (L). Jumlah relatif dari fasa yang terurai sangat bergantung kepada suhu pelelehan dan beberapa parameter proses lainnya. Untuk mencegah



Gambar 1. Diagram fasa pseudobinari sistem 123 {1}

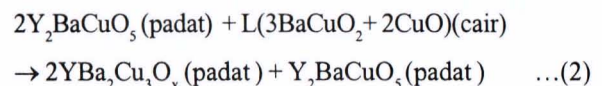


Gambar 2. Diagram proses pelelehan superkonduktor komposit fasa 123-fasa 211 dengan metode MMTG



Gambar 3. Diagram proses pelelehan superkonduktor dengan metode MTG [1]

terjadinya pertumbuhan fasa 211 terus menerus, suhu kemudian diturunkan dengan cepat (*quenched*) ke 1000°C atau disebut proses *modified melt-textured growth* (MMTG). Pada kondisi ini butiran fasa 211 berukuran kecil. Untuk pengintian (nukleasi) fasa 123, suhu didinginkan secara perlahan-lahan ke 900°C, digunakan *gradien* suhu 10°C [3,6]. Pada kondisi ini fasa 211 bereaksi kembali dengan fasa cair (L) membentuk fasa 123 dan fasa 211 menurut reaksi kimia sebagai berikut [1]:



struktur yang dihasilkan keduanya berbentuk padatan, yaitu fasa 123 dan fasa 211. Ini menunjukkan bahwa fasa 211 yang berbentuk padat, terjerat secara *random* di dalam matriks fasa 123. Hasil reaksi kimia ini juga menunjukkan bukti adanya reaksi peritektik. Struktur mikro cuplikan hasil *melt-textured* merupakan matriks fasa 123 berbentuk butiran berukuran panjang seperti pelat yang terarah ke suatu arah dan fasa 211 terperangkap dalam matriks fasa 123 [1,2,3,4].

Metode MMTG merupakan penyempurnaan dari metode *melt-textured growth* (MTG) seperti pada Gambar 3. Dalam proses MTG, cuplikan didinginkan secara lambat melewati suhu peritektik. Hasilnya adalah cuplikan yang *highly textured*, namun konektivitas antara butir-butir fasa 123 sangat jelek. Selama proses pertumbuhan butir fasa 123, maka fasa 211 dan fasa L (fasa cair) keduanya harus tetap disuplai dan oleh karena itu bila distribusi fasa 211 tidak homogen, maka di daerah yang mana kerapatan 211 rendah, reaksi pembentukan fasa 123 berlangsung sesaat. Jadi bila cuplikan didinginkan secara lambat pada daerah fasa 211+L, maka fasa 211 tumbuh terus hingga memiliki ukuran butir besar dengan distribusi tidak homogen. Akibatnya, konektivitas fasa superkonduksi menjadi lemah. Oleh karena itu, agar pertumbuhan fasa 211 tidak terjadi, maka proses MTG perlu di modifikasi.

METODE PERCOBAAN

Pembuatan fasa 123 dipersiapkan melalui metode padatan [2,3,4]. Bahan baku serbuk dengan kemurnian tinggi dari Y_2O_3 , $BaCO_3$ dan CuO masing-masing ditimbang berdasarkan perbandingan mol ion Y: Ba: Cu = 1: 2: 3. Serbuk-serbuk tersebut dicampurkan dalam 150 mL aseton yang diputar dengan *magnetic stirrer*. Penggerusan dilakukan di dalam mesin *ball-mill* yang diputar selama 5 jam, diikuti tiga kali proses kalsinasi pada suhu 900°C selama 4 jam dan kemudian dicetak berbentuk pelet berukuran diameter 2,6 cm dan tebal 2-3 mm. *Sintering* diatur pada suhu 940°C selama 7 jam dengan naik dan turunnya *gradien* suhu diatur masing-masing 300°C/jam dan 60°C/jam. Pembuatan fasa 211 juga dilakukan melalui metode padatan dari serbuk-serbuk Y_2O_3 , $BaCO_3$ dan CuO dengan kemurnian tinggi, yang kemudian ditimbang berdasarkan perbandingan mol ion Y: Ba: Cu = 2: 1: 1. Pencampuran dan penggerusan dilakukan secara manual dengan *mortar agate* selama 5 jam, diikuti kalsinasi pada suhu 900°C/6 jam dan kemudian dicetak berbentuk pelet berukuran diameter 2,6 cm dengan tebal 2 mm sampai dengan 3 mm.

Pembuatan superkonduktor komposit fasa 123-fasa 211 dilakukan dengan metode *modified melt-textured growth* (MMTG) [1]. Sebanyak 0 %berat, 10 %berat, 15 %berat dan 20 %berat serbuk fasa 211 dicampurkan dengan serbuk fasa 123 sehingga diperoleh masing-masing 5 g cuplikan yang berturut-turut diberi nama: SKK-0, SKK-10, SKK-15 dan SKK-20. Kemudian

dicetak berbentuk pelet berukuran diameter 2,6 cm dengan tebal 2 mm sampai dengan 3 mm. Proses pelelehan dan karakterisasi komposit ditunjukkan pada Gambar 2, dengan tahapan sebagai berikut [5]:

1. cuplikan dipanaskan hingga suhu 1100 °C dengan *gradien* suhu 300 °C/jam, dan ditahan selama 12 menit,
2. selanjutnya cuplikan didinginkan dengan cepat ke suhu 1000 °C dengan *gradien* 400 °C/jam, diikuti pendinginan lambat dengan *gradien* 10 °C/jam ke 900 °C [3,6].
3. kemudian cuplikan didinginkan ke 500 °C dengan *gradien* 60 °C/jam dan diteruskan hingga suhu ruang. Kuantitas dan kualitas fasa di dalam cuplikan ditentukan dengan teknik difraksi sinar-X dan dianalisis dengan metode *Rietveld*, sedang struktur mikro cuplikan diamati dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Electron Dispersion X-rays* (EDX).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian dengan efek *Meissner* menunjukkan bahwa cuplikan fasa 123 hasil *sinter* yang akan digunakan sebagai bahan matriks komposit merupakan bahan superkonduktor fasa 123 yang dicirikan oleh adanya fenomena superkonduktivitas, yakni cuplikan tersebut melayang di atas permukaan medan magnet permanen SmCo.

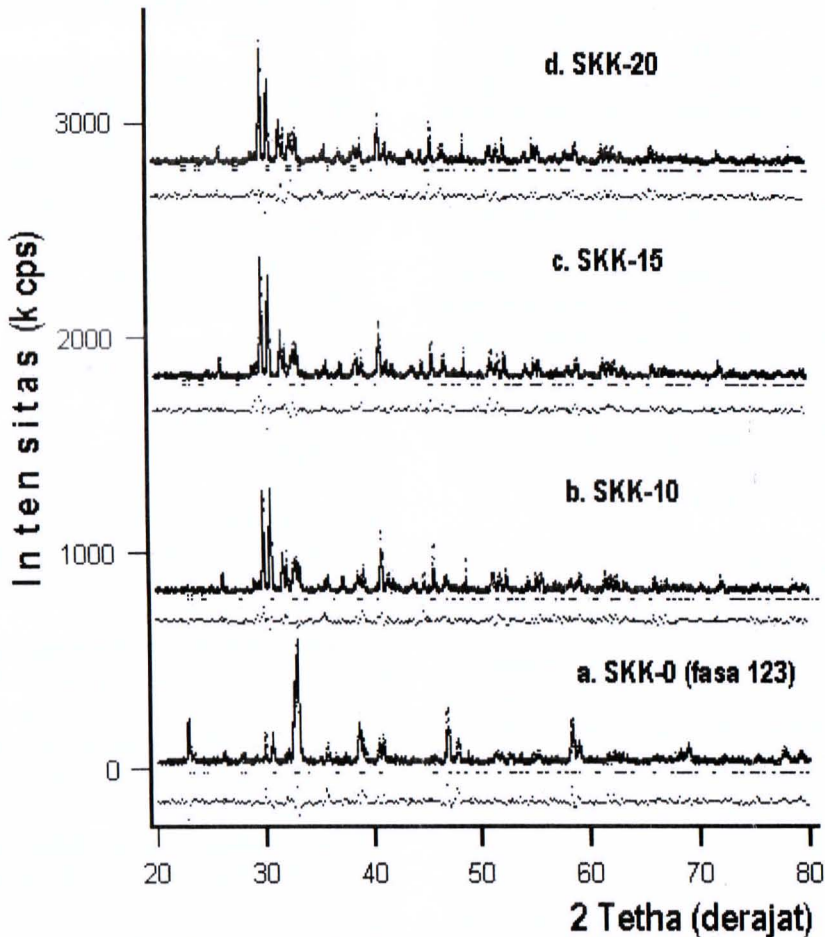
Pola difraksi sinar-x dari cuplikan superkonduktor komposit 123-211 hasil pelelehan ditunjukkan pada Gambar 4a sampai dengan Gambar 4d, terlihat bahwa bahan telah mengkristal dengan baik yang dicirikan oleh puncak-puncak difraksinya yang tajam. Hasil analisis dengan metode *Rietveld* [2,6] ditunjukkan pada Gambar 4. Tampak bahwa cuplikan telah mengkristal dengan baik yang dicirikan oleh puncak intensitas yang tajam. Pada cuplikan SKK-0, puncak-puncak pola difraksi didominasi oleh fasa 123, dengan puncak tertinggi pada sudut difraksi $2\theta = 32,597^\circ$ adalah bidang (013) seperti pada Gambar 4a. Sementara pada cuplikan SKK-10, SKK-15 dan SKK-20 puncak-puncak pola difraksi didominasi oleh fasa 211, dengan puncak tertinggi pada sudut difraksi $2\theta = 29,805^\circ$ adalah bidang (311) seperti pada Gambar 4b sampai dengan Gambar 4d.

Tabel 1. Faktor R pencocokan pola difraksi hasil kalkulasi dan observasi dengan metoda *Rietveld* dari cuplikan komposit fasa 123-fasa 211

| No | Nama Cuplikan | R_{WP} | R_p | Fasa 123 | | Fasa 211 | | S |
|----|---------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|-------|
| | | | | R_i | R_f | R_i | R_f | |
| 1. | 0 % 211 | 21,20 | 16,33 | 13,50 | 6,26 | 15,61 | 8,61 | 1,570 |
| 2. | 10 % 211 | 20,94 | 16,80 | 15,08 | 9,03 | 12,59 | 8,01 | 1,427 |
| 3. | 15 % 211 | 21,27 | 17,86 | 14,05 | 8,37 | 12,01 | 8,07 | 1,449 |
| 4. | 20 % 211 | 23,12 | 18,31 | 14,96 | 8,03 | 11,77 | 7,29 | 1,578 |

Tabel 2. Parameter kisi (*a, b, c*) cuplikan komposit fasa 123-fasa 211 hasil analisis dengan metoda *Rietveld*

| No. | Nama cuplikan | Fasa 123 | | | Fasa 211 | | |
|-----|---------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| | | a(Å) | b(Å) | c(Å) | a(Å) | b(Å) | C(Å) |
| 1. | 0% 211 | 3,882(1) | 3,869(1) | 11,676(4) | 12,185(9) | 5,656(4) | 7,127(3) |
| 2. | 10% 211 | 3.8371(2) | 3.8915(4) | 11.672(1) | 12.1868(5) | 5.6616(2) | 7.1357(3) |
| 3. | 15% 211 | 3.8834(3) | 3.8344(3) | 11.695(6) | 12.1883(5) | 5.6609(2) | 7.1378(3) |
| 4. | 20% 211 | 3.8566(4) | 3.9177(5) | 11.691(2) | 12.1792(5) | 5.6635(2) | 7.1380(3) |



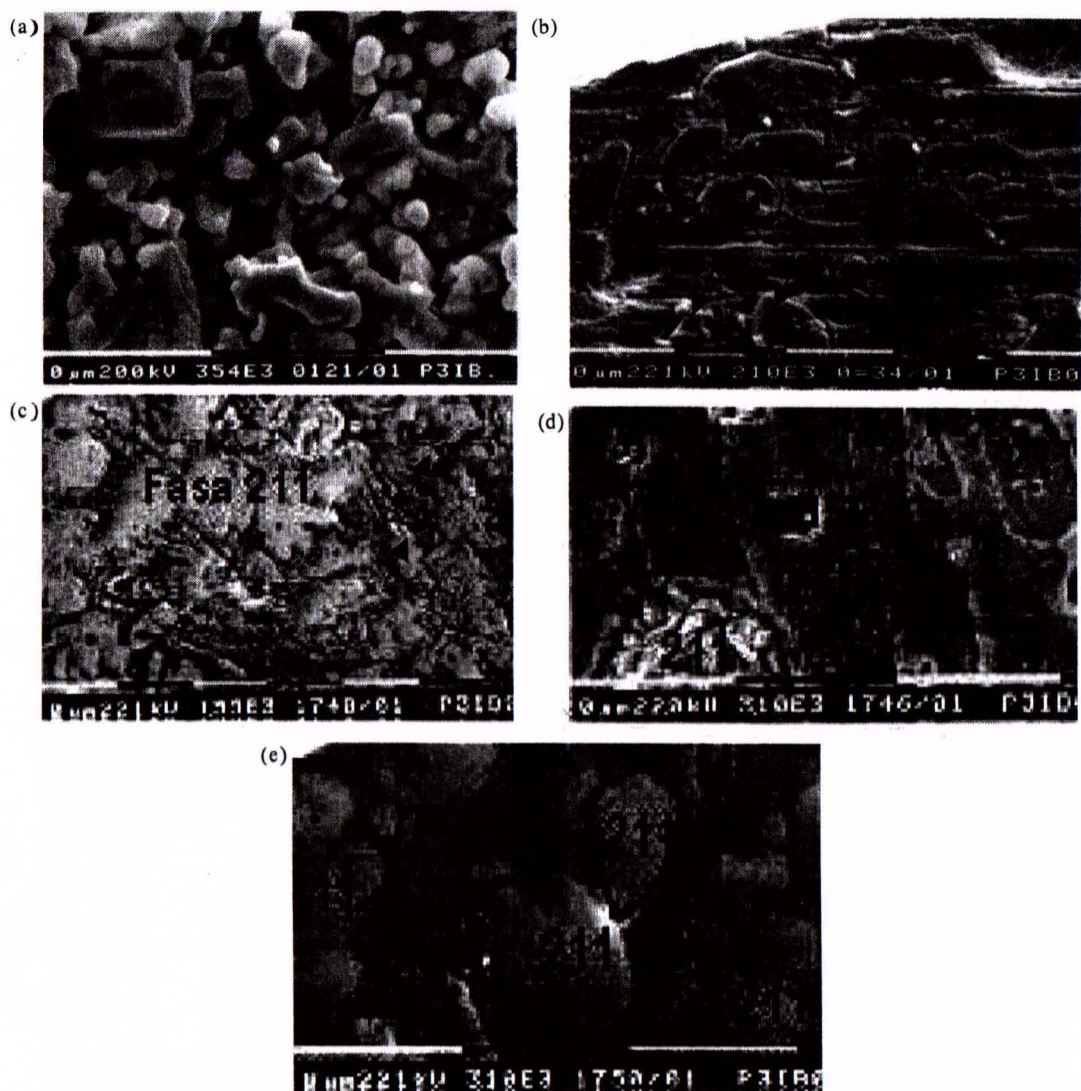
Gambar 4. Profil pola difraksi hasil analisis dengan metoda *Rietveld* dari cuplikan a). SKK-0, b). SKK-10, c). SKK-15, dan d). SKK-20.

Pola difraksi hasil analisis berimpit dengan pola difraksi hasil pengukuran. Hasil analisis pada kelima cuplikan memperlihatkan bahwa semua parameter struktur kristal dan parameter kisi berharga positif dan normal. Faktor R bernilai relatif cukup kecil, dan faktor S bernilai sedikit lebih besar dari nilai standar *Rietveld* ($S_{\text{standar}} = 1,30$) [2], seperti dicantumkan dalam Tabel 1. Parameter kisi (*a, b, c*) dapat dihitung hingga ketelitian empat angka dibelakang koma, seperti terlihat pada Tabel 2.

Struktur mikro hasil pemotretan dengan SEM dari cuplikan hasil *sintering*, dan hasil pelelehan ditunjukkan pada Gambar 5a. sampai dengan Gambar 5e. Gambar 5a merupakan hasil SEM dari cuplikan fasa 123 hasil *sintering*. Struktur mikro tersusun dari butiran halus yang bertumpang tindih (*overlapping*), terdistribusi secara

acak dengan dimensi ukuran sekitar < 10 mm dan mengandung porositas tinggi. Kondisi struktur mikro seperti ini memiliki densitas dan sifat mekanik rendah, serta kandungan porositas yang tinggi menjadi kendala pada kontak antar butiran, akibatnya sifat konduksi bahan tersebut rendah [7]. Selain dari itu, homogenitas dan *coupling* pada batas butir juga berpengaruh terhadap sifat konduksinya.

Gambar 5b sampai dengan Gambar 5d merupakan struktur mikro hasil foto SEM dari cuplikan hasil pelelehan SKK-10, SKK-15 dan SKK-20. Struktur mikro yang terbentuk memperlihatkan hampir seluruhnya padatan dan *highly textured* dengan struktur yang sangat terarah dan terdiri dari butiran berukuran panjang berbentuk seperti pelat yang juga disebut juga struktur *twin* [8,9,10]. Butiran berbentuk pelat diidentifikasi sebagai



Gambar 5. Struktur mikro superkonduktor hasil pemotretan dengan SEM dari (a) fasa 123 hasil sinter, (b) cuplikan SKK-0 (fasa 123), (c) SKK-10, (d) SKK-15 dan (e) SKK-20. Tanda panah menunjukkan fasa 211 berukuran $< 5 \mu\text{m}$

fasa 123 dengan ukuran dimensi panjang antara 100 mm sampai dengan 3000 mm dan lebar berukuran antara 3 mm sampai dengan 10 mm. Sedangkan butiran berbentuk hampir bulat sebagai penghalang (*blocky*) merupakan fasa 211, yang terdistribusi secara acak dalam matriks fasa 123. Inklusi fasa 211 yang terbentuk selama proses pelelehan bervariasi dari ukuran $< 5 \mu\text{m}$ (tanda panah pada Gambar 5b sampai dengan Gambar 5e) hingga berukuran $> 5 \mu\text{m}$. Namun inklusi fasa 211 dengan dimensi ukuran $> 5 \mu\text{m}$ yang mendominasi. Ini menunjukkan bahwa penurunan suhu dari 1100°C (suhu pelelehan) ke suhu 1000°C (suhu peritektik) terjadi secara perlahan, menyebabkan terjadinya pertumbuhan butir (*grain growth*) fasa 211. Padahal yang dikehendaki adalah penurunan suhu dengan cepat dengan gradien suhu $400^\circ\text{C}/\text{jam}$. Akibatnya, dengan penambahan kandungan fasa 211 ke dalam bahan 123 (untuk cuplikan SKK-10, SKK-15 dan SKK-20), reaksi pembentukan fasa 123 dan fasa 211 (dari persamaan reaksi 2) tidak terjadi

pada daerah di sekitar titik peritektik P-P' tetapi bergeser jauh mendekati daerah yang kaya fasa 211 yaitu pada daerah G-G' seperti ditunjukkan pada Gambar 1, sehingga fraksi massa fasa 211 yang terbentuk jauh lebih besar dari fraksi massa fasa 123. Hasil analisis dengan metode *Rietveld* dari fraksi massa fasa 123 dan fasa 211 dalam cuplikan komposit dicantumkan di dalam Tabel 3.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa cuplikan hasil pelelehan dengan metode MMTG telah mengkristal dengan baik, yang dicirikan oleh profil pola difraksi dengan memiliki puncak intensitas yang tajam. Struktur mikro yang terbentuk pada cuplikan hasil pelelehan seluruhnya berbentuk butiran berukuran panjang berbentuk seperti pelat-pelat-pelat yang terarah dengan baik (*well-aligned structure*). Butiran tersebut diidentifikasi sebagai bahan superkonduktor

$YBa_2Cu_3O_{7-x}$ atau fasa 123, sedangkan partikel yang terdispersi dalam fasa 123 berbentuk bulat diketahui merupakan fasa 211 dengan dimensi ukuran bervariasi dari 2 mm sampai dengan 10 mm. Namun demikian, hasil pengamatan memperlihatkan bahwa partikel 211 dengan dimensi ukuran > 5 mm masih mendominasi. Ini menunjukkan bahwa penurunan suhu dari suhu pelelehan ke suhu peritektik berjalan dengan perlahan, sehingga pada penambahan fasa 211 sebanyak 10 %berat, 15 %berat dan 20 %berat terhadap fasa 123, proses reaksi bergeser pada daerah yang kaya fasa 211 dan terjadinya pertumbuhan butir. Akibatnya, fraksi massa fasa 211 tumbuh lebih besar dari fasa 123.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kepala Puslitbang IPTEK Bahan dan Kepala Bidang Bahan Maju yang telah membantu hingga selesainya makalah ini. Demikian pula kepada Pimpinan proyek P3IB atas dukungan material pada penelitian ini, juga kepada Ibu Ari. Handayani dan rekan-rekan lain yang telah membantu penyelesaian makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. M. MURAKAMI, Review Article, *Supercond., Sci., Technol.*, **5** (1992) 185-203
- [2]. E. SUKIRMAN, dan WISNU ARI ADI, *Majalah Batan*, **XXXIII** (1/2) (2000) 31-45
- [3]. DIDIN S. WINATAPURA, WISNU ARI ADI, GRACE TJ. SULUNGBUDI, dan E. SUKIRMAN, *Prosiding Pertemuan Ilmiah Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bahan*, (2002) 168-172
- [4]. WISNU ARI ADI, E. SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA, dan ARI HANDAYANI, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **5** (2004) 51-56
- [5]. ENKIR SUKIRMAN, *Thesis Magister*, Jakarta (1991)
- [6]. WISNU ARI ADI, E. SUKIRMAN, dan DIDIN S. WINATAPURA, *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Ilmu Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, Yogyakarta (2003) 342-350
- [7]. GRACE TJ. SULUNGBUDI dan DIDIN S. WINATAPURA, *Laporan Riset Unggulan Terpadu V, Bidang Ilmu Bahan 1997-2000*, Jakarta, (2000)
- [8]. B. MARTINEZ, S. PINOL, V. GOMIS, and N. VILATA, *Transaction of Applied Superconductivity*, **5** (1955) 1611-1614
- [9]. S. JIN, T. H. TIEFEL, R. C. SHERWOOD, M.E. DAVIS, R. B. VAN DOVER, and G. W. KAMMLATT, *Appl. Phys. Lett.*, **52** (1988) 2074-2076
- [10]. M. MURAKAMI, M. MORITA, K. DOI, *Japanese Journal of Applied Physics*, **28** (1989), 1189-1194