

## SINTESIS DAN KARAKTERISASI YBCO SKALA NANO

E. Sukirman, Wisnu A.A., Yustinus P., D. Sahidin W., dan Th. Rina M.

Pustek Bahan Industri Nuklir, Kawasan Puspipstek, Setu, Tangerang, Banten 15314  
Email : skm2792@batan.go.id

### ABSTRAK

**SINTESIS DAN KARAKTERISASI YBCO SKALA NANO.** Sintesis dan karakterisasi superkonduktor YBCO skala nano telah diteliti. Superkonduktor skala nano disintesis dari superkonduktor sistem YBCO ( $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ). Oksida penyusun, yaitu  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ , dan  $CuO$  ditimbang kemudian dicampurkan dengan media ethanol menggunakan magnetic steering sebagai pengaduk di dalam gelas beaker. Selanjutnya dilakukan proses kalsinasi pada  $T_k = 900^\circ C$  selama 5 jam dan diulang sampai tiga kali. Prekursor hasil kalsinasi kemudian digerus dengan High Energy Milling (HEM) selama  $t = 0, 30, 50, 70,$  dan 90 jam dan selanjutnya prekursor berturut-turut disebut YKM-00, YKM-30, YKM-50, YKM-70, dan YKM-90. Serbuk hasil milling dikarakterisasi dengan teknik difraksi sinar-x, metode analisis Rietveld. Prekursor YKM-90 kemudian dicetak menjadi pelet. Selanjutnya dilakukan proses sintering pada suhu dan periode waktu yang divariasikan. Kemudian dikarakterisasi secara kualitatif dan kuantitatif dengan teknik difraksi sinar-x metode Rietveld. Ukuran kristalit dihitung menggunakan rumus Scherrer. Hasil analisis menunjukkan bahwa dengan memperkecil ukuran kristalit, periode sinter bisa dipersingkat dari 10 menjadi 1 jam, diperoleh ukuran kristalit,  $D = 925 \text{ \AA}$ , rapat arus kritis  $J_c = 4 \text{ A/cm}^2$ , dan dapat ditumbuhkan 15 % berat fasa-211 di dalam 85 % berat matriks fasa-123. Agar penyusutan ukuran kristalit superkonduktor menimbulkan perubahan sifat-sifat fisis bahan secara dramatis, maka bahan harus memiliki ukuran kristalit,  $D$  lebih kecil atau sama dengan coherence length,  $\xi = 10 \text{ \AA}$ .

**Kata kunci :** superkonduktor skala nano, YBCO, high energy milling

### ABSTRACT

**SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF NANO SCALE YBCO.** Synthesis and characterization of the nano scale YBCO superconductor have been performed. The nano scale superconductor was synthesized from YBCO system ( $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ). Raw materials, namely  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ , and  $CuO$ , were balanced and mixed with ethanol using magnetic steering as a churn in a beaker glass. Then, the precursor was calcined at  $T_k = 900^\circ C$  for 5 hours and repeated it until three times. The resulting precursor was ground by using High Energy Milling (HEM) for  $t = 0, 30, 50, 70,$  and 90 hour and hereinafter precursors are successively referred as YKM-00, YKM-30, YKM-50, YKM-70, and YKM-90. The resulting powders phase were characterized by means of x-ray diffraction technique using the Rietveld analysis method. Precursor of YKM-90 was pressed into pellets, and then sintered at various temperatures and periods. The sample phase was then characterized by using the Rietveld analysis method based on the x-ray diffraction data. The crystallites size were calculated using Scherrer formula. Results of analysis indicate that by minimizing crystallites size, period of sinter can be shortened from 10 to 1 hour, resulting crystallite size of  $D = 925 \text{ \AA}$ , critical current density of  $J_c = 4 \text{ A/cm}^2$ , and can be grown of about 15 weight % of 211-phase in a matrix of 123-phase. The decrease of crystallite size will generate a change in physical properties dramatically, if the crystallite size of the material,  $D$  is smaller or equal to the coherence length of  $10 \text{ \AA}$ .

**Key words :** nanoscale superconductor, YBCO, high energy milling

## 1. PENDAHULUAN

Aplikasi bahan superkonduktor ukuran nano (*nanosized superconductors*) dalam industri sangat prospektif pada masa-masa mendatang, terutama dalam bidang industri tenaga listrik. Departemen Energi Amerika Serikat memprediksi pasar untuk bahan superkonduktor nano tersebut sekitar \$ 200 milyar/tahun [1]. Di Pustek Bahan Industri Nuklir, aplikasi *bulk* STT (Superkonduktor Tc Tinggi) telah dilakukan sejak tahun 2002 pada sistem pengamanan jaringan listrik, yang disebut *superconducting fault current limiter* (SFCL) [2-5]. Kegiatan tersebut telah sampai kepada tahap pembuatan SFCL semiprototipe dan kajian teori-modeling prototipe SFCL.

Pada penelitian terdahulu [6] telah dilakukan proses pelelehan pelet YBCO fasa-123 ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ) di atas pelet YBCO fasa-211 ( $\text{Y}_2\text{BaCuO}_5$ ) sebagai alas. Fasa-123 meleleh menjadi fasa-211 dan fasa cair *L* ( $3\text{BaCuO}_2+2\text{CuO}$ ) dan memenuhi reaksi kimia:  $2\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x \rightarrow \text{Y}_2\text{BaCuO}_5 + 3\text{BaCuO}_2 + 2\text{CuO}$ . Penelitian tersebut bertujuan menentukan periode waktu reaksi antara fasa cair *L* dengan fasa-211 sedemikian sehingga diperoleh 25 % berat fasa-211 dan 75 % berat fasa-123. Dimana komposisi fasa tersebut adalah komposisi optimal fasa-211 di dalam matriks fasa-123. Komposisi optimal tersebut diperoleh manakala reaksi fasa-211 dan fasa cair *L* dilangsungkan dalam waktu  $t = 14,5$  dan/atau 16 menit.

Pada penelitian selanjutnya [7] dilakukan sintesis dan karakterisasi *bulk* superkonduktor sistem YBCO skala mikro dari prekursor non stoikiometris. Hasil analisis menunjukkan bahwa fasa-123 dan fasa-211 lebih mudah terbentuk jika digunakan prekursor YBCO non stoikiometris. Jika digunakan prekursor stoikiometris, fasa-123 baru terbentuk sempurna setelah proses sintering dan tidak disertai fasa-211. Penambahan prekursor YBCO non stoikiometris dengan 0,05 mol Ca, menyebabkan atom-atom kalsium masuk ke dalam struktur kristal fasa-123 menggantikan sebagian atom-atom Y, dan tidak terjadi transisi fasa. Namun manakala prekursor ditambah dengan 0,2 mol Ca, struktur fasa-123 berubah dari ortorombik menjadi tetragonal. Dengan prekursor non stoikiometris ( $\text{Y}_{0,95}\text{Ca}_{0,05}$ ) $\text{Ba}_{1,595}\text{Cu}_{2,405}\text{O}_{7-x}$  dapat ditumbuhkan fasa-123 dan fasa-211, dimana perbandingan kuantitas kedua fasa tersebut mendekati ideal (75 % : 25 %). Dikonfirmasi bahwa efek Meissner superkonduktor YBCO peka terhadap

jumlah mol atom O, tetapi tidak peka terhadap jumlah mol atom-atom logam Y, Ba, dan Cu.

Pada penelitian sekarang dilakukan sintesis dan karakterisasi superkonduktor YBCO skala nano melalui proses *milling* energi tinggi. Penelitian YBCO skala nano dilakukan dengan menyusutkan ukuran kristalit fasa-123 dari skala mikro menjadi skala nano, diharapkan fasa-123 tersebut memiliki sifat unggul, antara lain memiliki rapat arus kritis,  $J_c$  lebih tinggi dibandingkan dengan  $J_c$  pada superkonduktor skala mikro. Tujuan penelitian ini adalah memperoleh suatu paket teknologi sintesis dan karakterisasi superkonduktor YBCO skala nano yang terdiri dari 75 % berat fasa-123 sebagai matriks dan 25 % berat fasa-211 yang kelak akan berfungsi sebagai pusat-pusat jepitan vorteks. Sehingga jika kualifikasi itu dipenuhi, maka superkonduktor YBCO tersebut memenuhi syarat untuk aplikasi pada industri energi.

## 2. BAHAN DAN TATA KERJA

Superkonduktor skala nano disintesis dari sistem YBCO, yakni senyawa  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  yang biasa disebut fasa-123. Senyawa ini dibuat dari tiga macam oksida penyusun, yaitu  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ , dan  $\text{CuO}$ , masing-masing oksida memiliki kemurnian 99,9 %. Massa oksida-oksida tersebut ditimbang dengan menggunakan neraca analitik dengan ketelitian sampai tiga atau empat angka dibelakang koma. Kemudian oksida-oksida hasil penimbangan dicampurkan dengan media *ethanol* sekitar 150 cc dan diaduk dengan *magnetic steering* di dalam gelas *beaker*. Langkah kegiatan ini bertujuan untuk memperoleh campuran yang homogen. Selanjutnya dilakukan proses kalsinasi pada  $T_k = 900^\circ\text{C}$  selama 5 jam dan diulang sampai tiga kali. Prekursor hasil kalsinasi kemudian digerus dengan *High Energy Milling* (HEM) selama  $t = 0, 30, 50, 70,$  dan 90 jam dan selanjutnya prekursor berturut-turut disebut YKM-00, YKM-30, YKM-50, YKM-70, dan YKM-90.

Serbuk hasil *milling* dikarakterisasai dengan teknik difraksi sinar-x dan dianalisis dengan metode Rietveld. Ukuran kristalit dihitung menggunakan rumus Scherrer [8]:

$$\beta\left(\frac{\cos \theta}{\lambda}\right) = 2\eta\left(\frac{\sin \theta}{\lambda}\right) + \frac{0,9}{D} \quad (1)$$

Dimana:

$\beta$  : FWHM (*full width at half maximum*)

- $\eta$  : regangan kisi  
 $\theta$  : sudut puncak Bragg  
 $\lambda$  : panjang gelombang (1,54056 Å untuk radiasi Cu K $\alpha_1$ )  
 $D$  : ukuran kristalit

Jadi dengan rumus Scherrer diperoleh ukuran kristalit untuk suatu puncak difraksi tertentu. Oleh karena itu, untuk memperoleh data ukuran kristalit dari suatu cuplikan, maka perhitungan dilakukan pada beberapa puncak difraksi, kemudian diambil harga rata-ratanya.

Prekursor YKM-90 kemudian dicetak menjadi pelet dengan cara sebagai berikut : 1) serbuk YBCO dimasukkan secara merata ke dalam cetakan baja, 2) kemudian serbuk YBCO ditekan dengan tekanan  $P = 3.000$  psi (*pounds per square inch*) selama 1-5 menit. Selanjutnya dilakukan proses sintering pada suhu dan periode waktu yang divariasikan seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Ketujuh cuplikan tersebut pada Tabel 1, serta cuplikan Y123-SP, yakni cuplikan YBCO produk sinter tanpa *milling* [9], dikarakterisasi secara kualitatif dan kuantitatif dengan teknik difraksi sinar-x metode Rietveld. Ukuran kristalit cuplikan-cuplikan hasil sinter juga ditentukan dengan rumus Scherrer [8].

**Tabel 1. Data variasi suhu dan waktu sinter pada cuplikan YMS1, YMS2, YMS3, YMS4, YMS5, YMS6 dan YMS7 masing-masing setelah dilakukan *milling* selama 90 jam.**

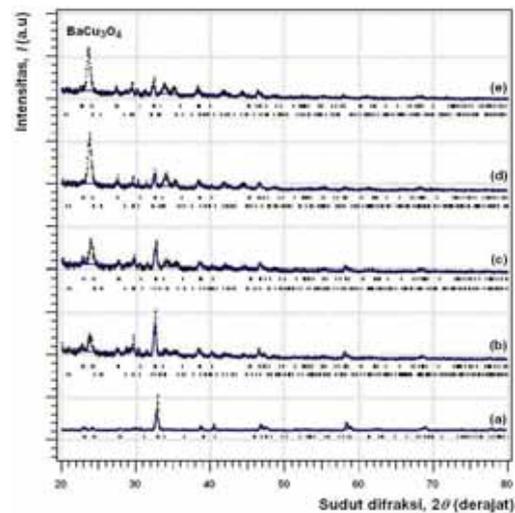
No.	Cuplikan	Sinter	
		Suhu (°C)	Periode (jam)
1.	YMS1	920	10
2.	YMS2	930	5
3.	YMS3	930	10
4.	YMS4	940	1
5.	YMS5	940	3
6.	YMS6	940	5
7.	YMS7	940	10

Selain karakterisasi dengan teknik difraksi sinar-x, juga dilakukan uji efek Meissner, karakterisasi struktur mikro dengan menggunakan mikroskop elektron sapuan, SEM, pengukuran suhu transisi kritis,  $T_c$  dan rapat arus kritis,  $J_c$  dengan metode probe empat titik.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis data difraksi dari prekursor YKM-00, YKM-30, YKM-50, YKM-70, dan

YKM-90 ditunjukkan pada Gambar 1. Tampak pada gambar tersebut bahwa tanpa *milling*, pada prekursor hanya ada fasa-123 yang belum sempurna terbentuk, namun setelah dilakukan proses HEM pada prekursor terbentuk fasa-123, fasa-211 dan fasa asing diduga BaCu<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Hasil analisis dengan metode AAN (Analisis Aktivasi Neutron) menunjukkan bahwa Fe tidak teridentifikasi di dalam cuplikan. Ini berarti perlakuan HEM tidak menyumbangkan pengotor Fe terhadap cuplikan. Semakin lama proses HEM dilakukan, semakin besar kadar BaCu<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yang terbentuk dan semakin berkurang fasa-123 dan fasa-211 di dalam cuplikan. Data ukuran kristalit ditunjukkan pada Tabel 2.



**Gambar 1. Pola difraksi sinar-x dari cuplikan produk kalsin yang telah digerus dengan HEM selama : 0 jam (a), 30 jam (b), 50 jam (c), 70 jam (d), dan 90 jam (e).**

Tampak pada Tabel 2, bahwa sebelum dilakukan *milling*, ukuran kristalit prekursor adalah 371 Å, namun ukuran kristalit malah membesar setelah *milling* dan mencapai nilai maksimum, yakni 7233 Å setelah *milling* selama 50 jam. Ukuran kristalit mengecil kembali sejalan dengan bertambahnya waktu *milling*, dimana setelah dilakukan *milling* selama 90 jam, ukuran kristalit menjadi 493 Å.

Peristiwa yang terjadi di dalam HEM adalah tumbukan bola-serbuk-bola. Partikel-partikel serbuk terperangkap diantara bola-bola baja yang sedang bertumbukan. Selanjutnya, serbuk-serbuk mengalami deformasi mikroskopik dan/atau proses *fracture* (pecah) dan / atau penggabungan (*welding*). Jadi, pada awal proses *milling* hingga waktu *milling*  $t = 50$

jam, terjadi *welding*. Oleh karena itu ukuran kristalit terus membesar. Dan manakala waktu *milling* diperpanjang hingga  $t > 50$  jam, maka mulai terjadi *fracture* pada kristalit-kristalit prekursor. Oleh karena itu, ukuran kristalit menyusut. Morfologi serbuk hasil proses *milling* tergantung pada sifat mekanik serbuk-serbuk yang ditumbuk tersebut. Secara umum serbuk memiliki sifat mekanik *ductile* (liat), atau *brittle* (mudah patah).

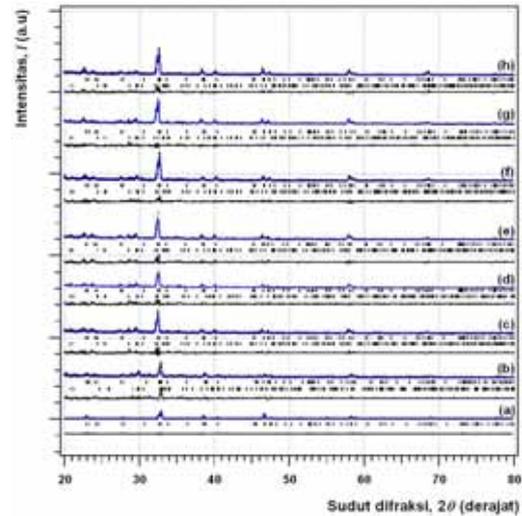
Tujuh cuplikan hasil proses sinter pada Tabel 1, ditambah satu buah cuplikan YBCO produk sinter tanpa *milling* (Y123-SP) [9] dikarakterisasi secara kualitatif dan kuantitatif dengan teknik difraksi sinar-x metode analisis Rietveld. Hasil karakterisasi ditunjukkan pada Gambar 2 dan data ukuran- kristalit ditunjukkan pada Tabel 3. Suatu cuplikan dikatakan memenuhi syarat untuk diaplikasikan pada piranti penyimpan energi, seperti SMB (*Superconducting Magnetic Bearing*), jika memenuhi minimal dua kriteria, yakni memiliki ukuran kristalit terkecil dan terdapat impuritas fasa-211 di dalam matriks fasa-123 dengan perbandingan fasa matriks : fasa impuritas = 75:25 dalam persen berat.

**Tabel 2. Ukuran kristalit,  $D$  (Å) pada prekursor produk kalsin setelah dilakukan *milling* dengan HEM pada prekursor YKM-00, YKM-30, YKM-50, YKM-70, dan YKM-90.**

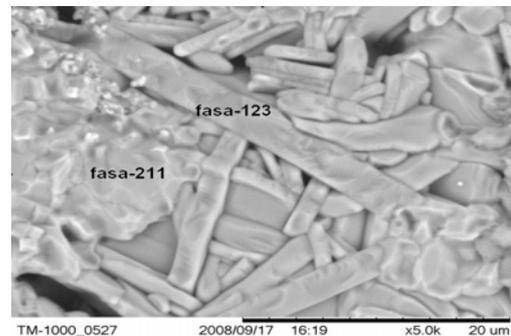
No.	Prekursor	Waktu <i>milling</i> (jam)	$D$ (Å)
1.	YKM-00	0	371
2.	YKM-30	30	731
3.	YKM-50	50	7233
4.	YKM-70	70	692
5.	YKM-90	90	93

Tampak pada Tabel 3 tersebut bahwa cuplikan yang memiliki ukuran kristalit terkecil adalah YMS1. Namun, karena kadar fasa-211 di dalam YMS1 terlalu besar (lebih besar dari 25 % berat), maka cuplikan tersebut ditolak, dimana menurut M. Murakami [10], komposisi ideal cuplikan superkonduktor YBCO terdiri dari 25 % berat fasa-211 dan 75 % berat fasa-123. Jadi, yang paling mendekati kriteria untuk aplikasi adalah cuplikan YMS4. Seperti terlihat pada Tabel 3, bahwa YMS4 adalah cuplikan hasil proses *milling* selama 90 jam, kemudian disinter pada 940°C selama 1 jam. Dari data ini dapat disimpulkan bahwa dengan memperkecil ukuran kristalit, maka periode sinter bisa

dipersingkat dari 10 menjadi 1 jam.



**Gambar 2. Pola difraksi sinar-x dari cuplikan produk sinter dengan variasi suhu dan waktu seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Kurva (a): Y123-SP (tanpa *milling*), (b): YMS1, (c): YMS2, (d): YMS3, (e): YMS4, (f): YMS5, (g): YMS6, dan (h): YMS7**



**Gambar 3. Struktur mikro YMS4**

Struktur mikro YMS4 ditunjukkan pada Gambar 3. Tampak pada gambar tersebut, bahwa butir-butir kristal sebagian berupa batang-batang pendek dan sebagian lain berupa batang lebih panjang dalam suatu susunan yang tidak teratur. Jadi, cuplikan terdiri dari butir-butir berupa batang berbagai ukuran, itulah fasa-123 superkonduktor YBCO, dan bagian yang menggumpal adalah fasa-211. Ukuran kristalit,  $D = 925$  Å adalah rata-rata ukuran butir yang berupa batang. Efek Meissner ditunjukkan pada Gambar 4. Tampak pada gambar tersebut bahwa pelet YMS4 melayang beberapa milimeter di atas magnet permanen SmCo.



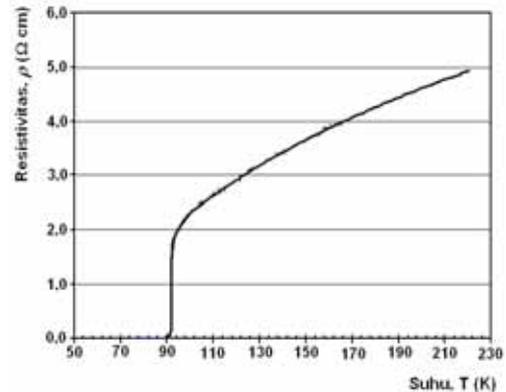
**Gambar 4. Efek Meissner pada YMS4.**

Kurva resistivitas pelet YMS4 terhadap suhu ditunjukkan pada Gambar 5. Pada gambar tersebut terlihat dengan jelas bahwa cuplikan YMS4 menampilkan suhu transisi kritis,  $T_c = 90$  K, sama dengan harga  $T_c$  cuplikan Y123-SP [9]. Kedua jenis cuplikan memiliki harga  $T_c$  sama, padahal proses pembuatan kedua cuplikan tersebut berbeda. Ini sekali lagi merupakan bukti bahwa  $T_c$  adalah besaran intrinsik.

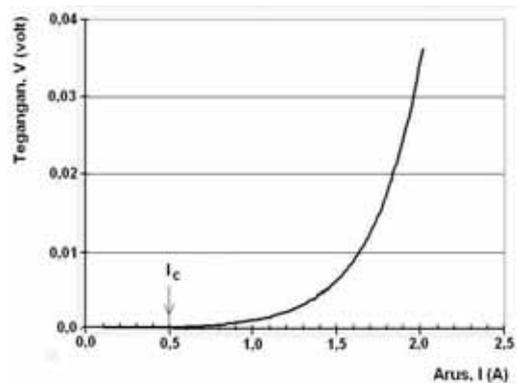
Kurva tegangan terhadap arus untuk YMS4 ditunjukkan pada Gambar 6 dan pada gambar tersebut tampak besaran arus kritis,  $I_c = 0,5$  A. Rapat arus kritis,  $J_c$  dihitung menggunakan rumus:  $J_c = I_c / \pi.s^2$ , dimana  $s$  = jarak antar probe [11], diperoleh  $J_c = 4$  A/cm<sup>2</sup>. Sedangkan cuplikan Y123-SP memiliki  $J_c = 8$  A/cm<sup>2</sup> [9] dan ukuran butir kristalit  $D = 1714$  Å.

Dari data-data tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan menyusutkan ukuran kristalit, maka rapat arus kritis juga menyusut. Hal ini dimungkinkan karena dengan semakin kecilnya ukuran butir kristalit, semakin banyak batas butir. Padahal batas butir merupakan *barrier* bagi arus super. Sehingga manakala arus super dialirkan pada bahan berskala nano, maka arus

super tersebut melintasi lebih banyak *barrier*, dibandingkan ketika arus super dilewatkan pada bahan berskala mikro. Oleh karena itu  $J_c$  bahan menyusut.



**Gambar 5. Kurva resistivitas terhadap suhu dari cuplikan YMS4.**



**Gambar 6. Kurva tegangan terhadap arus dari cuplikan YMS4.**

**Tabel 3. Ukuran kristalit,  $D$  (Å) pada YMS1, YMS2, YMS3, YMS4, YMS5, YMS6, YMS7, dan Y123-SP produk sinter.**

No.	Cuplikan	Suhu sinter (°C)	Periode (jam)	D (Å)	Fasa 123 (% berat)	Fasa 211 (% berat)
a.	Y123-SP	940	10	1714	100	0
b.	YMS1	920	10	366	55	45
c.	YMS2	930	5	1391	83	17
d.	YMS3	930	10	1468	81	19
e.	YMS4	940	1	925	85	15
f.	YMS5	940	3	1370	85	15
g.	YMS6	940	5	4735	87	13
h.	YMS7	940	10	3688	91	9

Agar penyusutan ukuran kristalit superkonduktor menimbulkan perubahan sifat-

sifat fisis bahan secara dramatis, maka bahan harus memiliki ukuran kristalit,  $D \leq \xi$  (*coherence length*). Hal ini terjadi karena jika  $D$  lebih kecil dari *coherence length*,  $\xi$ , maka parameter *superconducting order* akan hilang. Jadi, rapat arus kritis YBCO akan meningkat secara dramatis manakala bahan memiliki ukuran kristalit,  $D \leq 10 \text{ \AA}$ , dimana  $\xi$  pada YBCO adalah  $10 \text{ \AA}$  [12]. Pada kegiatan litbang mendatang akan dilakukan sintesis YBCO dengan metode kopresipitasi dan metode emulsi, agar diperoleh  $D \leq 10 \text{ \AA}$ .

#### 4. KESIMPULAN

Kegiatan sintesis dan karakterisasi superkonduktor berskala nano telah dilakukan. Superkonduktor skala nano disintesis dari sistem YBCO ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ) melalui urutan proses kalsinasi, *milling* dengan HEM, dan sintering. Dengan memperkecil ukuran kristalit, maka periode sinter bisa dipersingkat dari 10 menjadi 1 jam. Ukuran kristalit,  $D = 925 \text{ \AA}$  masih harus disusutkan hingga lebih kecil atau sama dengan *coherence length*,  $\xi$ ; demikian pula kandungan fasa-211 di dalam matriks fasa-123 masih perlu ditingkatkan hingga dicapai angka 25 % berat. Untuk mendapatkan hasil yang optimal disarankan untuk memperpanjang periode *milling* lebih dari 90 jam atau menerapkan metode sintesis lain, yakni kopresipitasi dan emulsi.

#### 5. UCAPAN TERIMAKASIH

Laporan ini adalah sebagian dari hasil kegiatan Uskeg Tahun Anggaran 2008, Kelompok Bahan Konduktor BKAN, PTBIN. Ucapan terimakasih dan penghargaan kami sampaikan kepada Bapak Ir. Iman Kuntoro (Kepala PTBIN), Dr. Setyo Purwanto (Kepala BKAN), Drs. Sumanto (Kepala BTU), dan rekan-rekan staf dan teknisi BKAN-PTBIN yang telah membantu kami dalam pelaksanaan kegiatan litbang ini.

#### 6. DAFTAR PUSTAKA

1. **HTS Nano-Ceramics, Ltd.**, *Introduces an innovation of cost effective nanofabrication of superconducting ceramic wire and other leads.*

Available:<http://www.nsti.org/Nanotech2006/showabstract.html?absno=21000>, diakses 10-12-2007.

2. **ENKIR SUKIRMAN, WISNU ARI ADI, DIDIN S. WINATAPURA DAN RISWAL H. SIREGAR**, Pembuatan dan Karakterisasi *Superconducting Fault Current Limiter* Skala Laboratorium (Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir, Yogyakarta, 23-24 Oktober 2003). Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Yogyakarta (2003) 63-67.
3. **ENKIR SUKIRMAN, WISNU ARI ADI, DIDIN S. WINATAPURA DAN MARDIYANTO**, Pengaruh Beban terhadap Tegangan Ambang dan Faktor Pembatasan Arus pada *Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL), Jurnal Ilmiah Teknik Mesin **7** (2005) 169-178.
4. **ENKIR SUKIRMAN, WISNU ARI ADI, DIDIN S. WINATAPURA DAN YUSTINUS**, Peningkatan Batas Arus Gagal pada *Superconducting Fault Current Limiter*, Jurnal Sains Materi Indonesia **7** (2005) 92-99.
5. **ENKIR SUKIRMAN**, Rancang Bangun Prototipe *Superconducting Fault Current Limiter* Model Induktif, Jurnal Sains Materi Indonesia **8** (2007) 102-108.
6. **ENKIR SUKIRMAN, WISNU ARI ADI, DIDIN SAHIDIN WINATAPURA DAN YUSTINUS M.P.**, Pembentukan Fasa Y211 dalam Matriks Fasa Y123 Superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , Jurnal Sains Materi Indonesia **8** (2007) 281-286.
7. **ENKIR SUKIRMAN, YUSTINUS MARGAPRATALA, WISNU ARI ADI, DAN DIDIN S. WINATAPURA**, Pengaruh Prekursor Non Stoikiometris terhadap Pembentukan Fasa Superkonduktor YBCO dan Pengaruh Doping Ca terhadap Struktur Kristal Superkonduktor YBCO, Jurnal Sains Materi Indonesia, Edisi Khusus Desember 2008, (2008) 187-194.
8. Crystallite Size and Microstrain Analysis of Thin Films, Ragaku, AMIA Laboratories, Resources, Application Notes, C01. Available: <http://amialabs.com/AppNoteC02.swf>, diakses tanggal 26 Juni 2006.
9. **ENKIR SUKIRMAN, DAN WISNU ARI ADI**, Sintesis Superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (Fasa-123) dengan Proses Pelelehan, Majalah BATAN **XXXIII**

- (2000) 31-45.
10. **M. MURAKAMI**, Review Article: Processing of Bulk YBaCuO, Sci. Technol. **5** (1992) 185-203.
  11. **W. ARI ADI, E. SUKIRMAN, D. S. WINATAPURA, G. TJ. SULUNGBUDI**, Faktor Koreksi Dimensi Sampel pada Sifat Listrik Superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  dengan Menggunakan Metode Four Point Probe, Majalah BATAN **XXXIV** (2001) 15-30.
  12. **MICHEL CYROT, DAVOR PAVUNA**, Introduction to Superconductivity and High- $T_c$  Materials, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore 9128, 1992, p.38.