

PENGARUH UKURAN SERBUK TERHADAP RAPAT ARUS KRITIS SUPERKONDUKTOR $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

Wisnu Ari Adi¹, Grace Tj. S.¹, Didin S. Winatapura¹, E. Sukirman¹,
Ari Handayani¹ dan Octavianus²

¹Puslitbang Iptek Bahan (P3IB) – BATAN

Kawasan Puspittek Serpong, Tangerang 15314

²Fakultas MIPA Jurusan Fisika Universitas Pajajaran

Jl. Raya Sumedang, Bandung

ABSTRAK

PENGARUH UKURAN SERBUK TERHADAP RAPAT ARUS KRITIS SUPERKONDUKTOR

$YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Pengukuran rapat arus kritis (J_c) superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sebagai fungsi dari ukuran serbuk dengan menggunakan metode *four point probe* telah dilakukan di laboratorium bidang bahan maju. Untuk memperoleh perbedaan ukuran serbuk pada sampel digunakan 3 ukuran ayakan, yaitu: 100 mesh, 200 mesh dan 300 mesh. Variasi ukuran serbuk terdiri dari 4 bagian, yaitu : -100 mesh ($x > 150 \mu m$), +100/-200 mesh ($75 < x \leq 150 \mu m$), +200/-300 mesh ($49 < x \leq 75 \mu m$), dan +300 mesh ($x \leq 49 \mu m$). Analisis kualitatif menunjukkan bahwa keempat sampel memiliki fasa yang sama dengan suhu transisi kritis (T_c) sebesar 91,1 K. Hasil pengukuran rapat arus kritis (J_c) adalah 14.404, 15.713, 19.641, dan 20.951 $A.m^{-2}$ berturut-turut untuk ukuran serbuk $x > 150$, $75 < x \leq 150$, $49 < x \leq 75$, dan $x \leq 49 \mu m$. Dari percobaan ini dapat disimpulkan bahwa semakin kecil ukuran serbuk maka semakin besar harga J_c yang diperoleh sebab densitas sampel semakin tinggi. Hasil ini sesuai dengan prediksi dari Choi dan kawan-kawan bahwa J_c meningkat akibat ukuran serbuk semakin kecil. Namun untuk ukuran serbuk $x \leq 75 \mu m$ kenaikan dJ_c/dx cukup kecil (awal daerah *plateau*). Jadi untuk memperoleh bahan superkonduktor dengan J_c yang cukup tinggi maka diperlukan prekursor dengan ukuran serbuk kurang dari atau sama dengan $75 \mu m$.

Kata kunci : Superkonduktor, ukuran serbuk, rapat arus kritis.

ABSTRACT

EFFECT OF POWDER SIZE ON THE CRITICAL CURRENT DENSITY OF SUPERCONDUCTOR $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

The measurements of critical current densities (J_c) on the superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ as a function of powder sizes have been performed by using four point probe method at advance materials division laboratory. In order to obtain different sizes of the samples we used 3 sieve sizes, namely 100, 200, and 300 meshes. The sizes variation of the powder consist of 4 size ranges, namely -100 mesh ($x > 150 \mu m$), +100/-200 mesh, ($75 < x \leq 150 \mu m$), +200/-300 mesh ($49 < x \leq 75 \mu m$), and +300 mesh ($x \leq 49 \mu m$). From the qualitative analysis shown that all four samples have the same phase, with the critical temperature at 91.1 K. The J_c measurement results are 14.404; 15.713; 19.641; and 20.951 $A.m^{-2}$, respectively for powder sizes $x > 150$, $75 < x \leq 150$, $49 < x \leq 75$, and $x \leq 49 \mu m$. From this experiment we conclude that the smaller of the powder size, the higher J_c value because of the density sampel increases. This result is in agreement with the prediction of Choi et al that the J_c value is increased by decreased the powder sizes [3]. But for powder sizes $x \leq 75 \mu m$, the increasing of dJ_c/dx is suite small (plateau range starting). Therefore in order to obtain a high J_c superconductor materials, it is required a precursor with the powder size that smaller or the same as $75 \mu m$.

Key words : Superconductor, powder size, critical current density.

PENDAHULUAN

Pada umumnya syarat untuk aplikasi praktis bahan superkonduktor adalah bahan tersebut harus memiliki rapat arus kritis (J_c) yang cukup tinggi dalam orde 10^5 - $10^6 A.cm^{-2}$ pada suhu $T = 77 K$ [1]. Pada kenyataannya untuk dapat memperoleh J_c tinggi pada superkonduktor oksida terutama sistem $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ tidak mudah. Sebab J_c bukan sifat intrinsik superkonduktor dan harga J_c ini

bisa berubah-ubah. Untuk meningkatkan harga J_c , salah satu faktornya adalah mengontrol ukuran serbuk, dan kenyataannya pengontrolan ukuran serbuk juga tidak mudah untuk dilakukan.

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan sintesis superkonduktor sistem $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ menggunakan metode reaksi padatan [2]. Pengukuran J_c

dilakukan dengan menggunakan metode *Four Point Probe* (FPP).

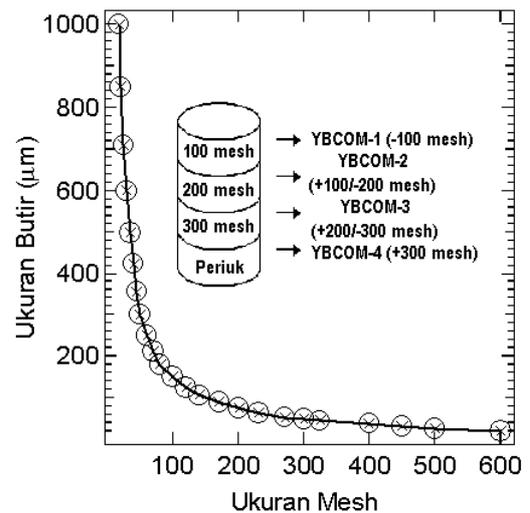
Harga J_c yang diperoleh yaitu sekitar 45 A.cm^{-2} untuk sampel hasil proses *sintering* dan 10^3 A.cm^{-2} untuk sampel hasil proses pelelehan. Berdasarkan hipotesis bahwa salah satu faktor untuk dapat meningkatkan harga J_c adalah dengan mengontrol ukuran serbuknya yaitu dengan cara membuat prekursor bahan ini berdasarkan perbedaan ukuran serbuk [3]. Sehingga strukturmikro dari bahan ini dapat dirubah sesuai dengan yang diinginkan.

Penelitian ini bertujuan untuk memahami dan mengkaji pengaruh dari ukuran serbuk terhadap perubahan harga rapat arus kritis *bulk* superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Diharapkan akan diperoleh prekursor dengan ukuran serbuk yang optimum dan didapatkan J_c yang cukup tinggi.

METODE PERCOBAAN

Sampel superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dibuat dengan metode *sol-gel* dengan mencampurkan bahan penyusun garam-garam nitrat, seperti : Yttrium Nitrat, Barium Nitrat, dan Tembaga Nitrat, pada perbandingan stokiometri unsur Y : Ba : Cu = 1 : 2 : 3. Hasil pencampuran tersebut dimasukkan ke dalam gelas pired kemudian ditambahkan asam oksalat dan etilen glikol sehingga campuran tersebut berubah warna menjadi biru muda. Proses pencampuran ini disebut dengan *sol*. Setelah itu campuran dipanaskan pada suhu $100 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 1,5 jam untuk pembentukan *gel*, kemudian didinginkan kembali sampai suhu kamar. *Gel* yang sudah terbentuk dipanaskan kembali pada suhu $400 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam hingga *gel* tadi berubah menjadi padatan (*solid*) dan warnanya juga berubah dari biru muda menjadi hitam. Pada suhu ini zat-zat organik yang ada di dalam campuran tersebut terurai atau terdekomposisi menjadi CO_2 dan H_2O [4]. Padatan yang berupa serbuk hasil dekomposisi tersebut dikeluarkan dari gelas *pirex* dan digerus selama 1 jam di dalam *mortal agate*. Setelah itu serbuk yang telah digerus, dimasukkan ke dalam *crucible* untuk dikalsinasi pada suhu $900 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 12 jam. Kemudian serbuk hasil kalsinasi, digerus kembali selama 1 jam. Tahapan berikutnya adalah memisahkan serbuk tadi menjadi 4 bagian berdasarkan kriteria ukuran ayakan (*sieve*) sebagai berikut : -100 mesh, +100-200 mesh, +200/300 mesh, dan +300 mesh. Teknik pengukuran serbuk ini disebut dengan metode *screening*.

Metode *screening* ini menggunakan ukuran ayakan standar (*standard sieve sizes*) seperti yang terlihat pada Gambar 1 [8]. Pada Gambar 1 juga tampak ilustrasi pemisahan serbuk menjadi 4 bagian. Pada ayakan 100 mesh, serbuk yang tertahan pada ayakan tersebut dituliskan -100 mesh, sedangkan serbuk yang lolos pada ayakan 100 mesh dan tertahan pada ayakan 200 mesh dituliskan +100/-200 mesh. Kemudian serbuk yang lolos dari ayakan 200 mesh dan tertahan pada ayakan 300 mesh dituliskan +200/-300 mesh. Dan yang lolos dari ayakan 300 mesh dituliskan +300 mesh.



Gambar 1. Grafik ukuran ayakan standar (*standard sieve sizes*) [8].

Serbuk yang sudah dipisahkan tadi ditimbang dengan neraca analitik masing-masing sebanyak 4 gram, kemudian dicetak dalam bentuk pelet (sampel silinder) dengan tekanan 2000 psi (13,8 MPa) dan berturut-turut disebut dengan YBCOM-1, YBCOM-2, YBCOM-3, dan YBCOM-4. Sampel-sampel yang telah dicetak tadi disinter pada suhu $940 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 10 jam di dalam aliran udara biasa [5]. Keempat sampel hasil *sintering* tersebut diuji sifat *Meissner*-nya, yaitu dengan cara : sampel tersebut direndam ke dalam nitrogen cair selama 10 menit, kemudian satu per satu diletakkan di atas permukaan magnet permanen pada suhu nitrogen cair ($T = 77 \text{ K}$) seperti yang terlihat pada Gambar 2. Apabila sampel melayang di atas permukaan magnet tersebut, berarti bahan tersebut diindikasikan sebagai bahan superkonduktor dan begitu sebaliknya.

Pengamatan strukturmikro sampel dilakukan dengan bantuan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Sedangkan kualitas dan kuantitas fasa-fasa yang ada di dalam sampel diamati dengan teknik difraksi sinar-x. Alat yang digunakan adalah *Philip Diffractometer* type PW1710. Pengukuran pola difraksi sampel dilakukan dengan berkas sinar-x dari *Tube anode* Cu dengan panjang gelombang, $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$, *Mode: continuous-scan*, *Step size : 0,02^\circ*, dan *time per step : 0,5 detik*. Pengukuran suhu transisi kritis T_c dan rapat arus kritis J_c sampel diukur dengan menggunakan Metode *Four Point Probe* (MFPP) [6,7]. Dan pengukuran densitas sampel menggunakan piknometer dengan metode *Archimedes*. Keempat karakterisasi tersebut dilakukan di Puslitbang Iptek Bahan - BATAN.

HASIL DAN PEMBAHASAN

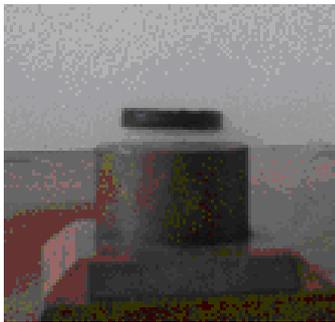
Berdasarkan pada Gambar 1, sampel YBCOM-1, YBCOM-2, YBCOM-3, dan YBCOM-4 memiliki ukuran serbuk seperti yang terlihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Konversi ukuran mesh menjadi ukuran serbuk

Sampel	Ukuran mesh	Ukuran serbuk (μm)
YBCOM-1	-100	$x > 150$
YBCOM-2	+100 / -200	$75 < x \leq 150$
YBCOM-3	+200 / -300	$49 < x \leq 75$
YBCOM-4	+300	$x \leq 49$

Untuk mengetahui sifat superkonduktivitas sampel, dilakukan pengujian efek *Meissner* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.

Pada Gambar 2, keempat sampel tampak melayang



Gambar 2. Efek *Meissner* dari sampel YBCOM-4

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

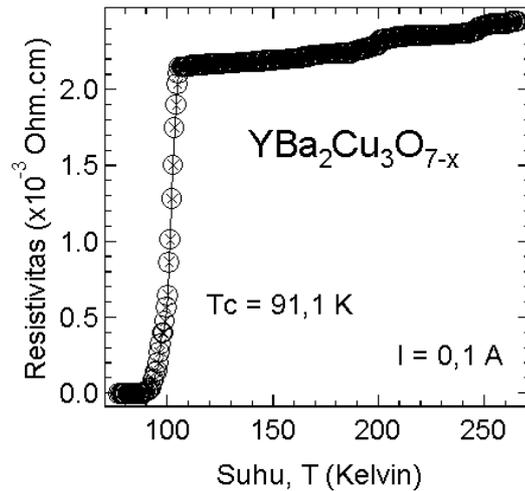
Namun apabila suhu bahan meningkat melebihi suhu transisi kritis (T_c) bahan ini, maka bahan tersebut akan kembali ke keadaan normal. Suhu transisi kritis bahan ini adalah 91,1 K seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 berikut.

Kurva T_c ini diperoleh dengan mengukur tegangan sampel pada setiap peningkatan suhu [6]. Kemudian data tegangan tersebut dikonversikan menjadi data resistivitas dengan menggunakan persamaan :

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right)$$

dimana $I = 0,1$ A dan $t = 0,2$ cm [7].

Pada Gambar 3 memperlihatkan adanya transisi tajam menuju resistivitas nol pada suhu T_c . Hal ini menunjukkan bahwa bahan tersebut mengalami perubahan sifat transport listrik dari resistif menjadi superkonduktif. Pada daerah suhu $T > T_c$, bahan bersifat resistif sehingga bahan memiliki resistansi ($\rho > 0$). Sedangkan pada daerah suhu $T \leq T_c$, bahan bersifat superkonduktif dimana elektron-elektron tersebut saling



Gambar 3. Kurva resistivitas bahan terhadap suhu

berpasang-pasangan (*pairing*) menurut teori *Bardeen Cooper Schrieffer* (BCS) sehingga transport listrik tidak mengalami hamburan ($\rho = 0$) [9]. Dengan demikian berdasarkan hasil dari kedua pengujian di atas, maka dapat disimpulkan bahwa keempat sampel tersebut adalah superkonduktor.

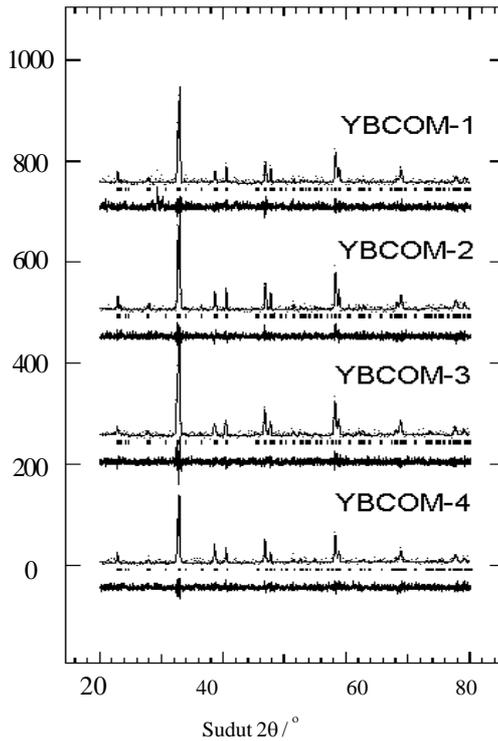
Setelah keempat sampel tersebut dinyatakan superkonduktor, maka karakterisasi selanjutnya menggunakan difraksi sinar-x untuk mengetahui kemurnian fasa-123 yang terbentuk. Gambar 4 merupakan hasil *refinement* (penghalusan) pola difraksi sinar-x sampel superkonduktor YBCOM-1, YBCOM-2, YBCOM-3, dan YBCOM-4 dengan menggunakan metode *Rietveld*.

Pada Gambar 4 tersebut tampak pola difraksi hasil analisis dan menunjukkan adanya puncak-puncak yang berimpit dengan profil pola difraksi fasa-123. Hasil *refinement* memberikan faktor R untuk sampel YBCOM-1, YBCOM-2, YBCOM-3, dan YBCOM-4 seperti yang terlihat pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Faktor R yang diberikan dari hasil *refinement* dengan metode *Rietveld*

Sampel	R_{WP}	R_P	R_t	R_F	S
YBCOM-1	24,74	15,71	18,43	10,00	1,1495
YBCOM-2	21,46	13,52	16,78	9,39	1,1681
YBCOM-3	21,31	13,59	11,10	7,26	1,1181
YBCOM-4	19,83	12,68	10,8	4,77	1,1216

Harga dari faktor R ini terlihat cukup kecil, dan faktor S bernilai lebih kecil dari nilai standar *Rietveld* ($S_{\text{standar}} = 1,30$). Untuk itu dengan menggunakan metode *Rietveld* dapat disimpulkan bahwa keempat sampel tersebut memiliki fasa yang relatif sama, yaitu fasa-123. Hal ini dilakukan untuk menghilangkan atau menormalisir pengaruh impuritas bahan terhadap hasil pengukuran J_c , sehingga diharapkan bahwa perbedaan hasil pengukuran J_c ini berasal dari pengaruh ukuran serbuk.

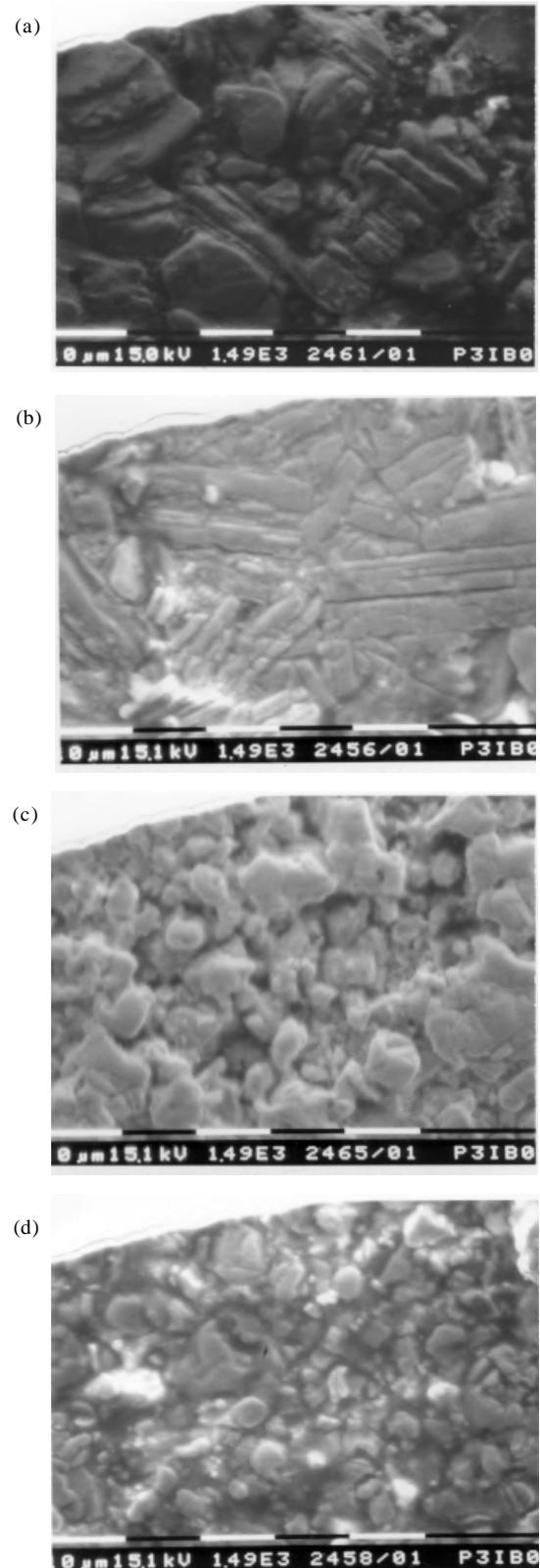


Gambar 4. Hasil *refinement* pola difraksi sinar-x sampel superkonduktor YBCOM-1, YBCOM-2, YBCOM-3, dan YBCOM-4.

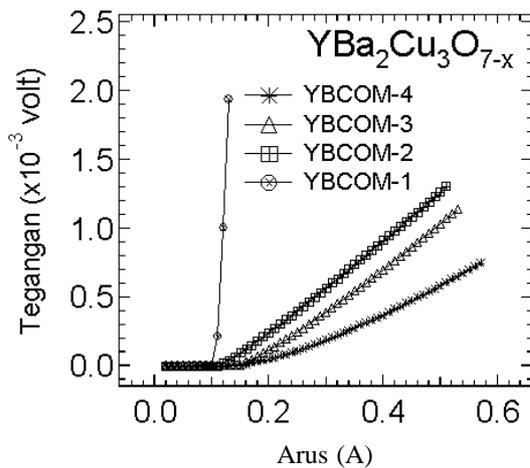
Berdasarkan Tabel 1 di atas bahwa setiap sampel memiliki batas ukuran serbuk yang berbeda-beda, maka untuk mendukung data tersebut diperlukan karakterisasi berikutnya, yaitu *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5 berikut ini.

Pada Gambar 5 terlihat secara jelas adanya perbedaan ukuran serbuk pada masing-masing sampel. Hal ini berarti bahwa preparasi awal pembuatan sampel dengan menggunakan metode *screening* ini memberikan hasil yang relatif sesuai dengan yang diharapkan setelah masing-masing sampel dilihat menggunakan foto SEM. Dari hasil foto SEM tersebut menunjukkan bahwa ukuran rata-rata serbuk sampel YBCOM-1 relatif lebih besar dibandingkan ukuran rata-rata serbuk sampel YBCOM-2, dan begitupula seterusnya untuk sampel YBCOM-2, YBCOM-3, dan YBCOM-4. Hasil ini diduga berkaitan atau berpengaruh terhadap perubahan nilai arus kritisnya. Gambar 6 dan Gambar 7 merupakan kurva peningkatan arus (I) terhadap besarnya perubahan tegangan (V) sebagai fungsi dari resistansi (R) untuk masing-masing ukuran serbuk.

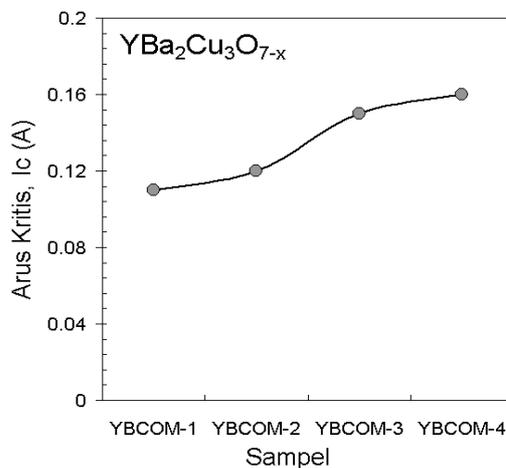
Pada Gambar 6 terlihat bahwa apabila aliran arus semakin dinaikkan sampai pada batas titik kritisnya maka tegangan secara spontan naik dengan tingkat ketajaman dari kenaikan tegangan atau sudut kemiringan kurva dV/dI pada masing-masing sampel berbeda-beda. Dalam hal ini dV/dI tampak mengalami penurunan dari sampel YBCOM-1 ke sampel YBCOM-4 yang berarti bahwa sampel YBCOM-1 memiliki harga resistansi paling besar dibandingkan dengan sampel-sampel yang lain.



Gambar 5. Hasil foto menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk sampel (a) YBCOM-1, (b) YBCOM-2, (c) YBCOM-3, dan (d) YBCOM-4



Gambar 6. Kurva tegangan, V terhadap arus, I



Gambar 7. Kurva I_c berbagai jenis sampel

Dari Gambar 7 tampak bahwa semakin kecil ukuran serbuknya maka semakin besar pula harga arus kritisnya, disamping itu juga bentuk kurva menunjukkan adanya kondisi saturasi. Hal ini berarti bahwa apabila ukuran serbuknya dibuat lebih kecil dari sampel YBCOM-4 ($x < 49 \mu\text{m}$) maka kenaikan arus kritisnya tidak terlalu signifikan atau sangat kecil. Sehingga dapat dikatakan bahwa apabila ukuran serbuk semakin kecil maka dV/dI dari titik arus kritisnya semakin kecil atau semakin landai dan arus kritis yang diperoleh akan semakin besar. Untuk memahami fenomena ini perlu ditinjau kembali tentang pemahaman konduktivitas listrik pada bahan superkonduktor dan bahan konduktor biasa.

Keadaan kritis bahan pada Gambar 6 ditunjukkan pada saat bahan tersebut memiliki resistansi nol (*superconductive state*) menuju ke keadaan non superkonduksi (konduktor). Indikasi ini dapat dilihat dari bentuk linieritas antara tegangan dengan arus. Hal ini sangat bersesuaian dengan kaidah Hukum Ohm, dimana tegangan (V) berbanding lurus dengan arus (I).

Perubahan perilaku bahan ini yang semula berada pada keadaan superkonduksi kemudian berubah menjadi

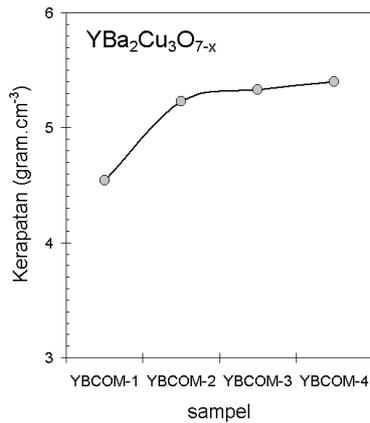
konduktor adalah adanya pemutusan pasangan elektron (*depairing*). Berdasarkan pada teori *Bardeen Cooper Schrieffer* (BCS) bahwa energi termal yang dihasilkan akibat aliran arus pada bahan sangat mempengaruhi terhadap besarnya energi (*pair interaction energy*) yang diperlukan untuk pembentukan pasangan elektron (pada superkonduktor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ disebut dengan *copper pair*. Dan *cooper pair* ini yang nantinya akan membawa arus super (*super current*) pada bahan superkonduktor tersebut. Pada suhu di bawah suhu transisi kritis ($T < T_c$), *pair interaction energy* ini akan semakin besar. Jadi apabila arus yang dialirkan ke bahan semakin besar sehingga menyebabkan energi termal yang dihasilkan juga membesar sampai melebihi besarnya energi kinetik pasangan elektron maka elektron-elektron yang berpasangan tadi akan putus menjadi elektron konduksi seperti yang terjadi pada bahan konduktor. Dengan demikian akan terjadi hamburan elektron oleh ketidakteraturan kisi, yaitu kontribusi tumbukan elektron dengan impuritas, pori (*void*), batas butir yang pada akhirnya akan menimbulkan resistansi pada bahan tersebut.

Dengan kata lain bahwa dengan diberikannya arus eksternal yang berubah terhadap waktu pada bahan tersebut berarti sama juga menyumbangkan energi termal sebesar I^2Rt . Apabila energi termal yang diterima melebihi energi kinetik pasangan elektron seperti yang telah dijelaskan sebelumnya pada teori BCS maka terjadi pemutusan pasangan elektron menjadi elektron normal. Pada keadaan ini hubungan V-I bersifat Ohmik seperti halnya konduktor biasa.

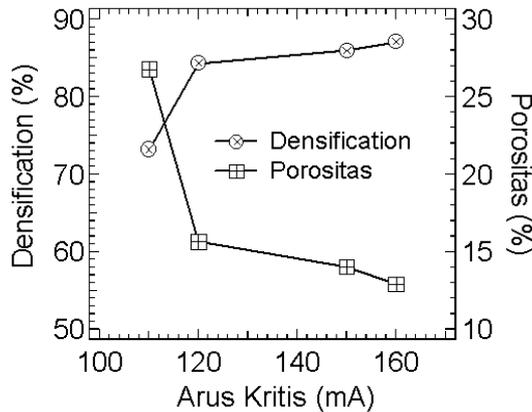
Ukuran serbuk mempengaruhi harga dV/dI dan besarnya arus kritis pada masing-masing sampel. Artinya semakin kecil ukuran serbuknya maka harga dV/dI semakin rendah dan besarnya arus kritis semakin besar. Hal ini dapat dijelaskan berdasarkan perbedaan kerapatan setiap sampel. Besar kecilnya ukuran serbuk ini berpengaruh terhadap besar kecilnya densitas bahan tersebut. Semakin kecil ukuran serbuknya, maka akan semakin besar kerapatannya.

Tingginya kerapatan suatu bahan mempunyai arti bahwa jumlah pori yang terkandung di dalam bahan tersebut semakin kecil, ikatan antar serbuk (*grain coupling*) semakin kuat atau berkurangnya pengaruh *weak link*, dan luas permukaan kontak antar serbuk yang satu dengan serbuk yang lain semakin besar. Sedangkan ketiga faktor tersebut, yaitu pori, *weak link*, dan kecilnya luas permukaan kontak antar serbuk merupakan salah satu penyebab timbulnya resistansi pada bahan saat bahan tersebut dialiri arus.

Gambar 8 menunjukkan hubungan antara kerapatan bahan ini terhadap ukuran serbuk. Semakin kecil ukuran serbuk semakin besar kerapatannya sehingga perbedaan harga dV/dI serta perbedaan besarnya arus kritis ini merupakan akibat adanya perbedaan ketiga faktor tersebut. Sebagai contoh pada sampel YBCOM-1, kerapatan bahan cukup rendah berarti pori cukup banyak



Gambar 8. Hubungan antara densitas sampel terhadap ukuran serbuk.



Gambar 9. Hubungan antara kenaikan arus kritis terhadap densification dan porositas bahan

sehingga resistansi bahan cukup tinggi seperti yang terlihat pada Gambar 9. Hal ini berakibat apabila arus yang mengalir terus ditingkatkan maka energi termal IRt akan terus membesar sehingga menyebabkan pemutusan pasangan elektron terjadi lebih cepat dibandingkan dengan sampel yang memiliki kerapatan lebih tinggi. Jadi pada sampel YBCOM-1 akan memiliki arus kritis lebih rendah dibandingkan dengan sampel yang lain dengan laju kenaikan tegangan atau sudut kemiringan kurva dV/dI tampak lebih besar dibandingkan dengan sampel yang lain.

Tabel 3 merupakan data hasil pengukuran densitas, perhitungan persen densification (D), porositas, dan pengukuran rapat arus kritis masing-masing sampel. Persen densification merupakan rapat massa relatif yaitu persentase perbandingan antara densitas sampel dengan densitas $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ standar ($\rho_{true} = 6,2 \text{ g.cm}^{-3}$). Sehingga persen densification [10] dapat dihitung berdasarkan persamaan :

$$\text{Persen densification, } D = \frac{\rho_{\text{sampel}}}{\rho_{\text{true}}} \times 100\%$$

Tabel 3. Hasil pengukuran kerapatan, densification, porositas, dan rapat arus kritis

Sampel	Kerapatan (g.cm ⁻³)	Densification (%)	Porositas (%)	Jc (A.m ⁻²)
YBCOM-1	4,54	73,23	26,77	14,404
YBCOM-2	5,23	84,35	15,65	15,713
YBCOM-3	5,33	85,97	14,03	19,641
YBCOM-4	5,40	87,09	12,91	20,951

Sedangkan porositas sampel [10] dapat didekati dengan persamaan :

$$\text{Porositas, } P = \left(1 - \frac{\rho_{\text{sampel}}}{\rho_{\text{true}}}\right) \times 100\%$$

Pada Tabel 3 dan Gambar 9 terlihat bahwa semakin besar kerapatan dan semakin kecil porositas sampel maka semakin tinggi arus kritisnya. Namun persen densification semakin tinggi tampak tingkat kenaikan arus kritis dI/dD tidak terlalu signifikan yang berarti bahwa bahan tersebut sudah dalam kondisi saturasi. Sehingga apabila dihubungkan dengan besarnya ukuran serbuk maka dapat disimpulkan bahwa untuk memperoleh rapat arus kritis (J_c) sampel yang tinggi cukup diperlukan ukuran serbuk sebesar kurang dari atau sama dengan $75 \mu\text{m}$ (awal daerah *plateau*).

KESIMPULAN

Hasil pengukuran rapat arus kritis (J_c) superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dengan beberapa variasi ukuran serbuk adalah sebagai berikut: sampel dengan ukuran serbuk $x > 150$, $75 < x \leq 150$, $49 < x \leq 75$, dan $x \leq 49 \mu\text{m}$ berturut-turut memiliki rapat arus kritis J_c 14.404, 15.713, 19.641, dan 20.951 A.m⁻². Salah satu faktor yang sangat mempengaruhi peningkatan harga J_c ini adalah kerapatan bahan yang semakin tinggi karena ukuran serbuk yang semakin kecil. Untuk memperoleh bahan superkonduktor dengan J_c yang cukup tinggi maka diperlukan prekursor dengan ukuran serbuk kurang dari atau sama dengan $75 \mu\text{m}$ (awal daerah *plateau*).

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Bapak Drs. Gunandjar, S.U. selaku Kepala Puslitbang Iptek Bahan BATAN, almarhum DR. Wuryanto sebagai pelopor kemajuan kelompok superkonduktor, kepada DR. Ridwan selaku Kepala Bidang Bahan Maju P3IB BATAN yang telah memberikan kesempatan untuk penelitian, kepada Drs. W. Prasud selaku Pimpro P3IB atas dukungan dana untuk kegiatan uspen ini, kepada DR. Evvy Kartini atas pengarahannya, dan kepada semua pihak yang telah membantu dalam kelancaran penulisan makalah ini.

DAFTARACUAN

- [1]. MURAKAMI, M., *Supercond. Sci. Technol.* **5** (1992) 185-203
- [2]. WISNU ARI ADI, E. SUKIRMAN, DIDIN S. W., GRACE TJ. S., M. RIFAIM., dan RIDWAN, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **3** (3), (2002) 9-14
- [3]. C.H. CHOI, S.H. HAN, C. ANDRIKIDIS, and Y.ZHAO, *Physica C* **282-287**, (1997) 2123-2124
- [4]. LIU, RU-SHI, *United State Patent, No. 4,977,109, December 11th*, (1990)
- [5]. SUKIRMAN, E., *Pengaruh Distribusi Kekosongan Oksigen pada Superkonduktivitas $YBa_2Cu_3O_7$* , Thesis Master Fakultas Pasca Sarjana Universitas Indonesia, (1991)
- [6]. WISNU ARI ADI, ENKIR SUKIRMAN dan DIDIN S. WINATAPURA, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **1** (3), (2000).
- [7]. WISNU ARI ADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA dan GRACE TJ. SULUNGBUDI, *Majalah BATAN*, **XXXIV** (1/2), (2001)
- [8]. RANDAL M. GERMAN, *Powder Metallurgy Science*, 2nd Edition, Metal Powder Industries Federation, New Jersey, (1994) 27-79
- [9]. BUCKEL, W., *Superconductivity*, VCH Publisher Inc., New York, (1991) 112-159
- [10]. YAMAGUCHI, T., *Characterization Technique for Ceramics*, Lecture Subcommittee of Japan Ceram. Soc., (1988).