

PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI RING $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ UNTUK FAULT CURRENT LIMITER SKALA LABORATORIUM

Wisnu Ari Adi, Engkir Sukirman, Didin S. Winatapura dan Ari Handayani

Puslitbang Iptek Bahan (P31B) – BATAN
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang 15314

ABSTRAK

PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI RING $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ UNTUK FAULT CURRENT LIMITER SKALA LABORATORIUM. Dua buah *ring* superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ telah dibuat dengan menggunakan metode kompaksi (*pressing*) yang telah dimodifikasi. *Ring1* memiliki diameter dalam 23,46 mm, diameter luar 40,66 mm, dan ketebalan 6,84 mm, sedangkan *ring2* memiliki diameter dalam 23,65 mm, diameter luar 40,73 mm, dan ketebalan 8,28 mm. Analisis XRD menunjukkan bahwa kedua *ring* memiliki fasa yang sama, yaitu fasa 123. Kedua *ring* memiliki suhu transisi kritis, T_c sebesar 91 K, dengan estimasi medan magnet induksi di pusat *ring1* dan *ring2* berturut-turut sebesar $1,27 \times 10^{-4}$ T ($I_c = 3,48$ A) dan $1,65 \times 10^{-4}$ T ($I_c = 3,52$ A).

Kata kunci : Superkonduktor, *ring*, medan magnet induksi.

ABSTRACT

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ RING FOR THE LABORATORY SCALE FAULT CURRENT LIMITER. Two rings of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconductor have been made by using the pressing method, that has been modified. The inner diameter, outer diameter, and thickness of ring1 are 23.46 mm, 40.66 mm, and 6.84 mm, while for ring2 are 23.65 mm, 40.73 mm, and 8.28 mm, respectively. The XRD data show that both samples have the same 123-phase. The critical temperature, T_c of both samples is 91 K. The estimate values of induction magnetic field at the center of ring1 and ring2 are 1.27×10^{-4} T ($I_c = 3.48$ A) and 1.65×10^{-4} T ($I_c = 3.52$ A), respectively.

Key words : Superconductor, ring, induction magnetic field.

PENDAHULUAN

Aplikasi superkonduktor suhu transisi kritis (T_c) tinggi (STT) untuk *fault current limiter* (FCL) dewasa ini menjadi topik penelitian yang sedang hangat dikembangkan terutama di negara-negara maju. Disamping ruang lingkupnya yang sangat luas, penelitian ini sangat dipertimbangkan sebagai aplikasi prioritas di masa depan [1]. Salah satu komponen dari FCL adalah STT dalam bentuk *ring* yang dibuat melalui proses pelelehan. Keunggulan *ring* dengan proses pelelehan adalah bahwa *ring* tersebut memiliki rapat arus kritis tinggi hingga mencapai $J_c = 1500$ A.cm⁻². Namun kendala yang dihadapi dalam pembuatan *ring* dari bahan STT melalui proses pelelehan yang dihasilkan selalu berubah geometrinya, hingga tidak bisa dipasang pada koker, padahal salah satu faktor yang menentukan dalam pembuatan FCL model induktif tingkat komersial adalah kemampuan untuk menghasilkan *ring* STT dengan proses pelelehan tersebut.

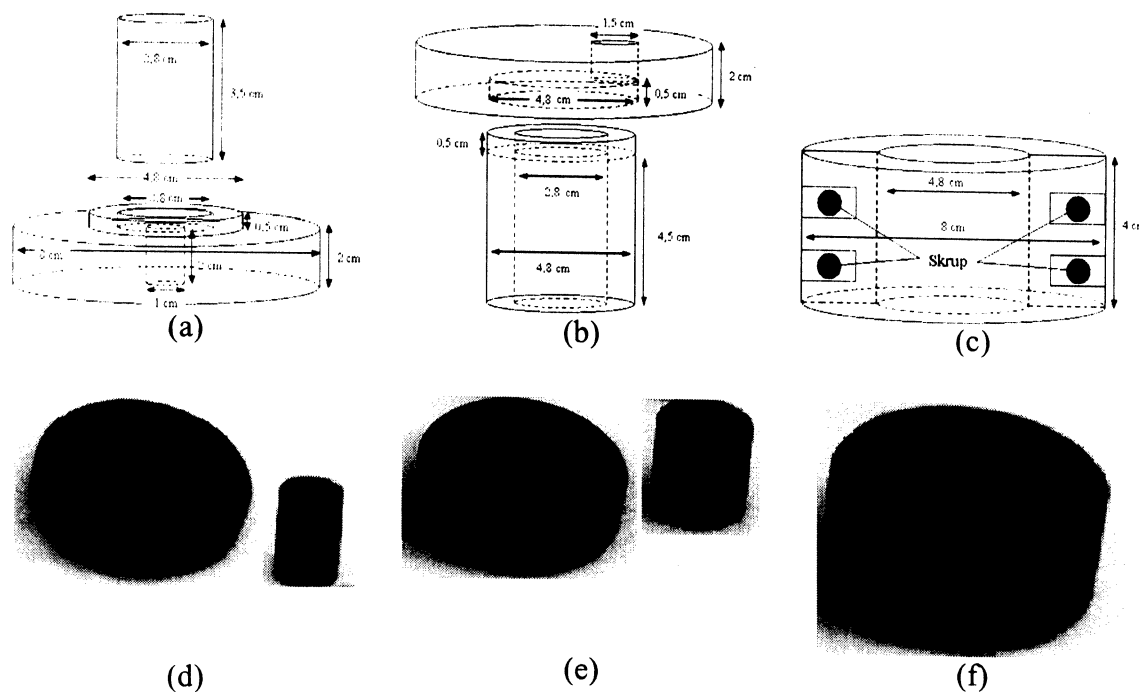
Pada penelitian sebelumnya, ada beberapa teknik yang digunakan untuk membuat *ring* STT ini yaitu metode *rotating furnace* dalam aliran oksigen dengan

menggunakan *Ag foil* sebagai substrat, *melt casting*, dan *dip coating* STT pada substrat bentuk silinder [2].

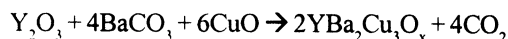
Penelitian sekarang bertujuan untuk membuat dan mengkarakterisasi *ring* superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dengan proses *sintering*, setelah terlebih dahulu dikompaksi. Proses kompaksi dilakukan di dalam sebuah alat cetak (*dies*) dengan tekanan kompaksi $P=3000$ psi. *Ring* $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ yang dihasilkan disamping dapat digunakan sebagai komponen dari FCL, juga dapat digunakan pada aplikasi STT yang lain, misalnya sebagai pelindung medan magnet, *Superconducting Magnetic Storage* (SMES), dan untuk *magnetic bearing* [3].

METODE PERCOBAAN

Sampel superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dibuat melalui reaksi padatan dari percampuran oksida-oksida penyusun, yaitu : Y_2O_3 , $BaCO_3$, dan CuO dengan perbandingan stokiometri unsur Y : Ba : Cu = 1 : 2 : 3, berdasarkan persamaan reaksi sebagai berikut :

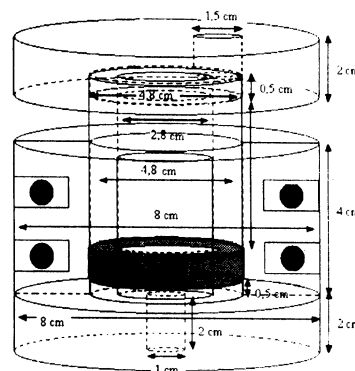


Gambar 1. Alat cetak sampel bentuk *ring*
 Gambar teknis : (a) bagian dasar, (b) bagian penekan, (c) bagian dinding
 Gambar foto : (d) bagian dasar, (e) bagian penekan, (f) bagian dinding



Pencampuran oksida-oksida tersebut dilakukan di atas *hot plate* dalam bejana gelas yang telah diisi dengan etanol 300 mL kemudian diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 10 jam. Setelah campuran mengering dilanjutkan dengan penggerusan dengan menggunakan *Ball Milling* selama 5 jam. Hasil dari pencampuran tadi, kemudian dimasukkan di dalam *crucible* dan dikalsinasi pada suhu 900 °C selama 12 jam, setelah itu dicetak dalam bentuk *ring* (cincin) berukuran diameter luar $D_{luar} = 48$ mm, diameter dalam $D_{dalam} = 28$ mm, dan ketebalan $t = 2$ mm, dengan tekanan 3000 psi.

Proses pencetakan sampel bentuk *ring* pada prinsipnya sama dengan proses pencetakan sampel bentuk *pellet* (silinder), namun ada beberapa bagian dari alat cetak tersebut yang harus dimodifikasi agar proses pelepasan sampel tidak mengalami kesulitan. Alat cetak sampel bentuk *ring* terdiri dari tiga komponen, yaitu bagian dasar, bagian penekan, dan bagian dinding. Tiap-tiap bagian digunakan sistem bongkar pasang (*knock down*), seperti yang terlihat pada Gambar 1. Khusus untuk bagian dinding, dijadikan dua bagian. Dan apabila akan digunakan untuk mencetak, dua bagian tersebut disatukan kembali dengan skrup. Pada saat sampel ditekan, maka bagian dinding dapat dibuka dengan melepaskan skrup tersebut, sehingga sampel mudah untuk dilepas dari cetakan dan tidak mudah retak atau pecah.



Gambar 1(g). Proses pencetakan

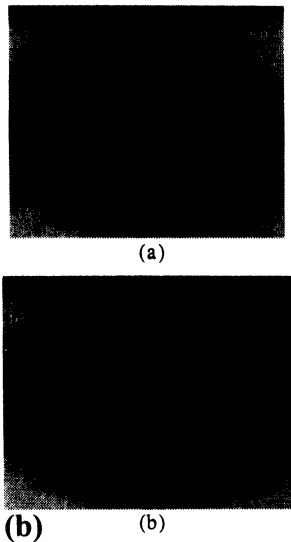
Preparasi di atas dilakukan sebanyak dua kali, sehingga diperoleh 2 buah sampel *ring* yang berturut-turut disebut dengan *ring1*, dan *ring2*. Kedua sampel tersebut *disinter* pada suhu 940 °C selama 10 jam di dalam aliran udara biasa [4].

Kedua *ring* hasil proses *sintering* tersebut dilakukan uji *Meissner* dengan cara diletakkan di atas permukaan magnet permanen pada suhu nitrogen cair ($T = 77$ K). Apabila sampel melayang di atas permukaan magnet tersebut, berarti bahan tersebut bersifat superkonduktor dan sebaliknya. 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, $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$, mode: continuous-scan, step size = $0,02^\circ$, dan time per step = 0,5 detik. Pengamatan strukturmikro ring dilakukan dengan menggunakan SEM (scanning electron microscope) 515 Philip. Sedangkan pengukuran suhu transisi kritis T_c dan rapat arus kritis J_c sampel diukur menggunakan alat ukur V-I dan V-T dengan metode Four Point Probe (MFPP) [5]. Kelima karakterisasi tersebut dilakukan di Puslitbang Iptek Bahan - BATAN.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil proses pencetakan sampel bentuk ring ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ bentuk ring : (a) ring1, dan (b) ring2

Setelah mengalami pemanasan (sintering), dimensi ring tersebut mengalami penyusutan (shrinkage), seperti yang terlihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Hasil pengukuran persen susut massa.

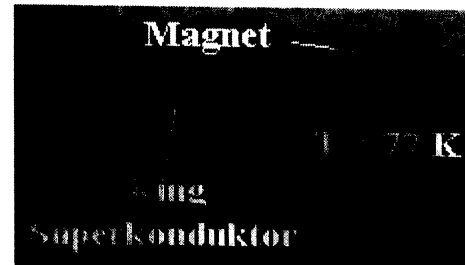
Nama sampel	Massa sampel (gram)		Persen susut Massa (%)
	Sebelum proses sintering	Setelah proses sintering	
ring1	29,9985	28,7330	4,22
ring2	33,4788	32,1355	4,01

Tabel 2. Hasil pengukuran persen susut volume.

Nama sampel	Dimensi sampel (mm)						Persen susut Volume (%)
	Setelah proses kalsinasi			Setelah proses sintering			
	Diameter Φ_{dalam}	Diameter Φ_{luar}	Tebal t	Diameter Φ_{dalam}	Diameter Φ_{luar}	Tebal t	
ring1	27,95	47,95	7,17	23,46	40,66	6,84	30,68
ring2	27,95	47,95	8,69	23,65	40,73	8,28	30,99

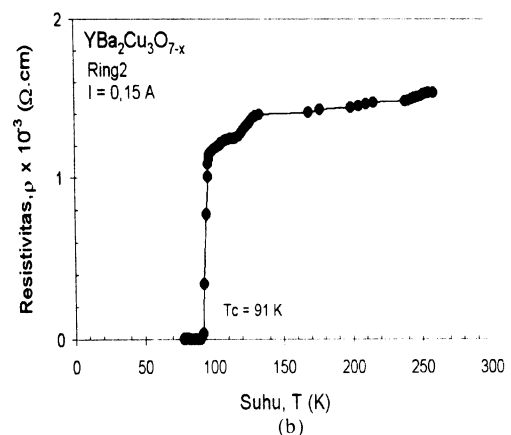
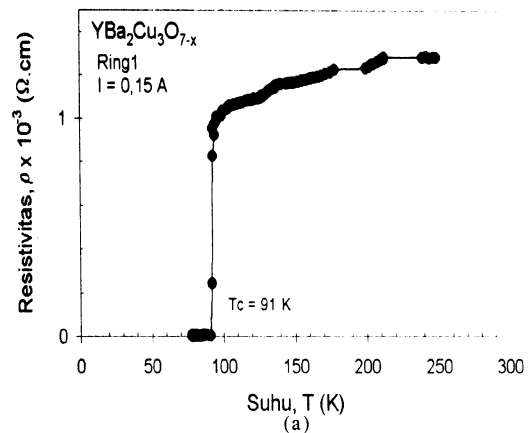
Penyusutan ini disebabkan karena terjadinya proses difusi antar butir, akibatnya rogga-rogga disekitar butir-butir tersebut berkurang sehingga geometri ring menjadi lebih kecil dari sebelumnya.

Untuk mengetahui sifat superkonduktivitas sampel, dilakukan pengujian efek Meissner seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.

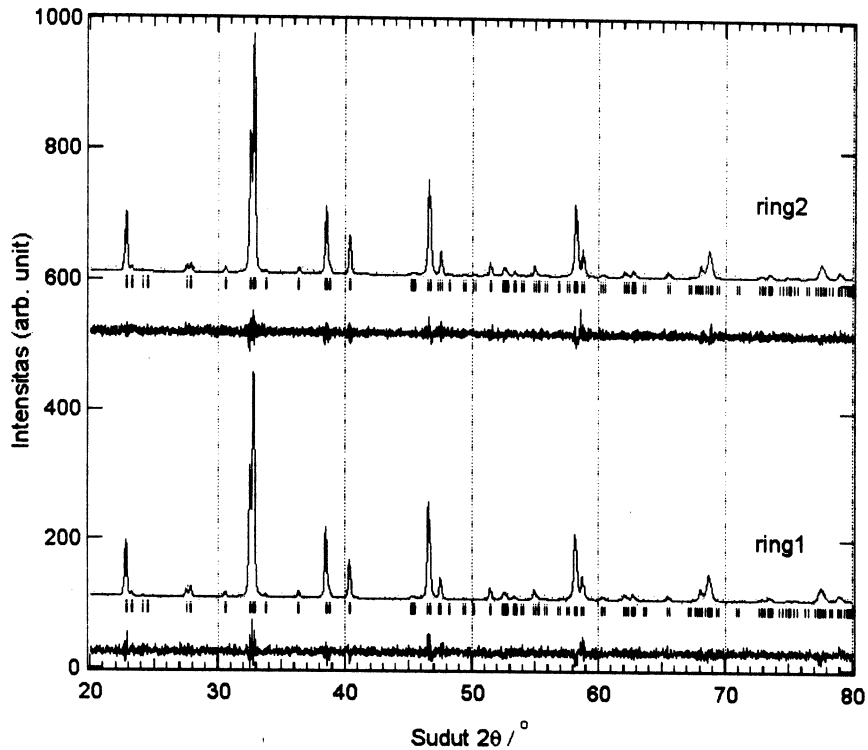


Gambar 3. Efek Meissner dari sampel ring1

Pada Gambar 3, tampak magnet permanen melayang di atas permukaan ring 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.



Gambar 4. Kurva resistivitas terhadap suhu : (a) ring1, dan (b) ring2



Gambar 4. Hasil *refinement* pola difraksi sinar-x sampel *ring1* dan *ring2*

Namun apabila suhu meningkat melebihi suhu transisi kritis (T_c) bahan ini, maka bahan tersebut akan kembali ke keadaan normal. T_c dari kedua sampel baik *ring1* maupun *ring2* adalah 91 K, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Kurva T_c ini diperoleh dengan mengukur tegangan sampel pada setiap peningkatan suhu [4]. Kemudian data tegangan tersebut dikonversikan menjadi data resistivitas dengan menggunakan persamaan di bawah ini

$$\rho = \frac{A}{s} \left(\frac{V}{I} \right)$$

dimana $I = 0,15$ A dan $s = 1,0$ cm [6].

Pada Gambar 3 diperlihatkan 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 berpasang-pasangan (*pairing*) menurut teori *Bardeen Cooper Schrieffer* (BCS) sehingga transport listrik tidak mengalami hamburan ($\rho = 0$) [7]. Dengan demikian berdasarkan hasil dari kedua pengujian di atas, maka dapat disimpulkan bahwa kedua sampel tersebut adalah superkonduktor.

Untuk mengetahui kemurnian fasa-123 yang terbentuk, maka dilakukan karakterisasi dengan

menggunakan difraksi sinar-x. Pola difraksi sinar-x untuk kedua sampel dapat dilihat pada Gambar 4. Gambar 4 merupakan hasil *refinement* (penghalusan) pola difraksi sinar-x sampel superkonduktor *Ring1*, dan *Ring2* 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 *ring1* dan *ring2* seperti yang terlihat pada Tabel 3 berikut ini.

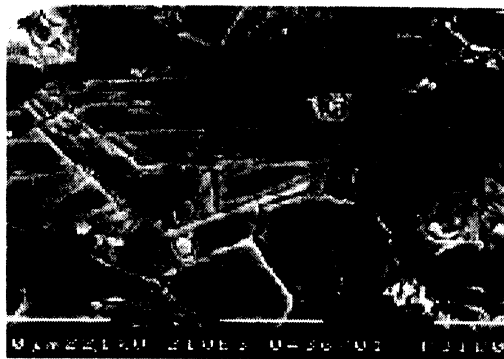
Tabel 3. Faktor R yang diberikan dari hasil *refinement* dengan metode *Rietveld*

Sampel	R_{wp}	R_p	R_t	R_r	S
<i>ring1</i>	21,31	13,59	11,10	7,26	1,1181
<i>ring2</i>	19,83	12,68	10,8	4,77	1,1216

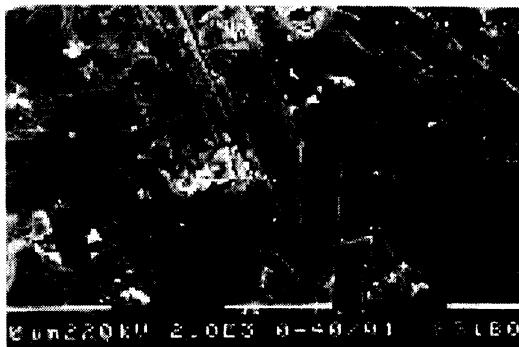
Harga dari faktor R ini terlihat cukup kecil, dan faktor S bernilai lebih kecil dari nilai standar *Rietveld* ($S_{\text{standar}} = 1,30$). Untuk itu dengan menggunakan metode *Rietveld* dapat disimpulkan bahwa kedua sampel tersebut memiliki fasa yang relatif sama, yaitu fasa-123.

Karakterisasi selanjutnya adalah *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang bertujuan untuk melihat struktur mikro kedua sampel. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5.

Tampak pada Gambar 5 bahwa ukuran butir kedua sampel relatif sama. Pada kedua sampel juga terlihat adanya porositas-porositas walaupun diduga relatif cukup sedikit.



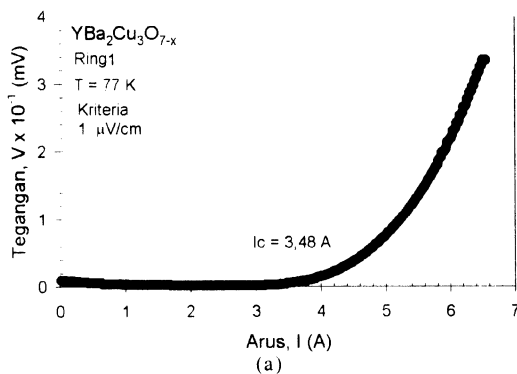
(a)



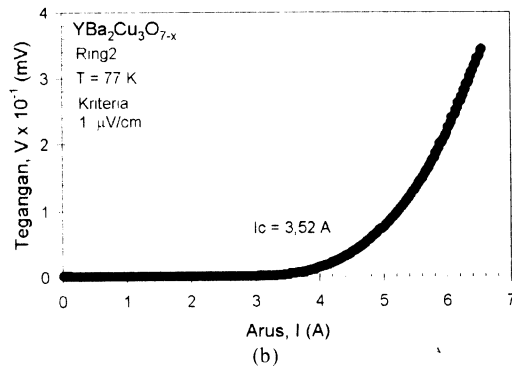
(b)

Gambar 5. Hasil foto menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) pada posisi tampak lintang (cross section) untuk sampel (a) ring1, dan (b) ring2

Gambar 6 merupakan kurva peningkatan arus (I) terhadap besarnya perubahan tegangan (V) sebagai fungsi dari resistansi (R) untuk kedua sampel. Pada Gambar 6 terlihat bahwa apabila arus semakin dinaikkan



(a)



(b)

Gambar 6. Kurva $V - I$ untuk sampel (a) ring1, dan (b) ring2

sampai pada batas titik kritisnya maka tegangan secara spontan naik. Keadaan kritis ini menunjukkan adanya perubahan perilaku bahan yang semula bahan tersebut memiliki resistansi nol (*superconductive state*) menuju ke keadaan non superkonduksi (*resistive state*). 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 superkonduktif kemudian berubah menjadi resistif karena 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 $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ disebut dengan *cooper 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.

Proses preparasi komponen *ring* ini akan digunakan untuk aplikasi pada *Fault Current Limiter (FCL)*. Pembatas arus gagal dari superkonduktor (FCL) bekerja berdasarkan pada transisi fasa yang cepat dari keadaan superkonduktor ke keadaan normal manakala arus meningkat melebihi harga arus kritis superkonduktor tersebut. Pada prinsipnya, FCL adalah sebuah transformator dengan lilitan sekunder berupa cincin dari bahan superkonduktor dan lilitan primer berupa kumparan kawat tembaga biasa. Superkonduktor berperan sebagai perisai teras besi terhadap pengaruh medan magnet yang dibangkitkan oleh arus AC pada kumparan primer, sedemikian sehingga teras besi tidak tertembus medan magnet tersebut. Bila arus pada

kumparan primer sangat besar (akibat terjadi hubungan singkat), arus induksi pada cin-cin superkonduktor melebihi arus kritisnya (I_c). Dengan demikian cin-cin tidak lagi ada dalam keadaan superkonduktor dan oleh karena itu fluksi magnetik menembus teras besi dan impedansi FCL menjadi sangat besar. Jadi, pada kondisi demikian FCL berfungsi sebagai pembatas arus [8].

Pada Gambar 6 tampak bahwa arus kritis (I_c) sesuai dengan kriteria $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ [9] adalah sebesar 3,48 A dan 3,52 A yang berturut-turut untuk sampel *ring1* dan *ring2*. Apabila arus tersebut mengalir di dalam sampel maka medan magnet induksi B dapat didekati berdasarkan teori *Solenoid*. Apabila titik pengukuran medan magnet terletak pada pusat dari *Solenoid* [10], maka diperoleh rumusan sebagai berikut :

$$B = \frac{\mu_0 i N}{2(r_2 - r_1)} \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + (\ell/2)^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + (\ell/2)^2} + r_1}$$

Dimana B , μ_0 , I , N , r_1 , r_2 , dan ℓ berturut-turut adalah medan magnet induksi, permeabilitas ($4\pi \times 10^{-7}$), arus, jumlah lilitan, jari-jari lingkaran dalam, jari-jari lingkaran luar, dan panjang lilitan. Sehingga dapat diperkirakan besarnya medan magnet induksi pada titik tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Medan magnetik induksi yang ditimbulkan oleh *ring* tersebut pada kondisi tanpa inti besi untuk *ring1* dan *ring2* berturut-turut adalah $1,62 \times 10^{-4}$ T dan $1,56 \times 10^{-4}$ T.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan medan magnetik induksi yang besar yang dihasilkan oleh *ring* superkonduktor adalah :

1. Bahan superkonduktor tersebut harus memiliki J_c yang tinggi, hal ini dapat diperoleh apabila *ring* tersebut diperoleh dari hasil proses pelelehan [2].
2. Dimensi *ring*, yaitu selisih antara diameter luar dan diameter dalam harus cukup kecil. Hal ini disebabkan karena arus yang mengalir pada sampel bentuk silinder sesuai dengan kaidah arus *Eddy* (*Eddy Current*) berada pada tepi luar. Jadi apabila *ring* tersebut terlalu lebar maka jarak antara putaran arus dengan inti besi semakin jauh dan bahan yang berada pada tepi dalam menjadi *gap* (penghalang atau *barrier*) sehingga induksi medan magnet yang dibangkitkan menjadi kecil.

KESIMPULAN

Telah dikembangkan sebuah metode kompaksi untuk proses preparasi *ring* superkonduktor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Metode ini menggunakan alat cetak pelet (*dies*) yang telah dimodifikasi. Kedua sampel *ring* tersebut memiliki T_c yang sama yaitu 91 K, dan dapat membawa arus kritis I_c di atas 3 A dengan B sekitar 2×10^{-4} T.

Untuk mendapatkan medan magnetik induksi yang besar yang dihasilkan oleh *ring* superkonduktor adalah bahan superkonduktor tersebut harus memiliki J_c yang tinggi dan dimensi *ring*, yaitu selisih antara diameter luar dan diameter dalam harus cukup kecil. Proses ini dapat juga dikembangkan untuk fabrikasi komponen bentuk *ring* yang lain.

DAFTAR ACUAN

- [1]. PAUL, W., BAUMANN, T., RHYNER, J., PLATTER, F., IEEE *Trans. Appl. Supercon* **5** (1995) 1059
- [2]. CHEN, M., BAUMANN, T., UNTERNAHRER, P., PAUL, W., *Physica C* **282-287** (1997) 2639-2640
- [3]. COOMBS, T.A., CAMPBELL, A.M., GANNEY, I., LO, W., TWARDOWSKI, T., DAWSON, B., *Materials Science and Engineering B* **53** (1998) 225-228
- [4]. SUKIRMAN, E., *Pengaruh Distribusi Kekosongan Oksigen pada Superkonduktivitas $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$* , Thesis Master, Fakultas Pasca Sarjana Universitas Indonesia (1991).
- [5]. WISNU ARI ADI, ENKIR SUKIRMAN, dan DIDIN S. WINATAPURA, *Jurnal Sains Materi Indonesia* **1**(3), (2000)
- [6]. WISNU ARI ADI, ENKIR SUKIRMAN dan DIDIN S. WINATAPURA, GRACE TJ. SULUNGBUDI, *Majalah BATAN*, **XXXIV** (1/2) (2001) 15-30.
- [7]. BUCKEL, W., *Superconductivity*, VCH Publisher Inc., New York, (1991) 112-159.
- [8]. ENKIR SUKIRMAN, WISNU ARI ADI, DIDIN S. WINATAPURA dan RISWAL H. SIREGAR, *Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir* (2003) 63-67.
- [9]. OLDENBURG, K.E., MORRISON, W.A., BROWN, G.C., *Am. J. Phys.* **61** (9) (1993).
- [10]. SMYTHE, WR., *Static and Dinamic Electricity*, McGraw-Hill, New York, (1950) 266.