

REVIEW **KEGIATAN LITBANG SUPERKONDUKTOR T_c TINGGI** **DI P3IB-BATAN**

Engkir Sukirman, Wisnu Ari Adi, Didin S. Winatapura dan
Grace Tj. Sulungbudi

Puslitbang Iptek Bahan (P3IB) - BATAN
Kawasan Puspipstek Serpong, Tangerang, 14315

ABSTRAK

REVIEW KEGIATAN LITBANG SUPERKONDUKTOR T_c TINGGI DI P3IB-BATAN. Makalah ini merupakan tinjauan tentang kegiatan litbang superkonduktor T_c tinggi (STT) di Bidang Bahan Maju, P3IB-BATAN. Kegiatan litbang bertujuan untuk menguasai proses sintesis pelet, komposit, dan lapisan tipis STT jenis Y-123 dan Bi-2223 untuk diaplikasikan. Aplikasi STT diawali dengan pembuatan alat peraga fenomena superkonduktivitas untuk sekolah menengah umum dan universitas. Selanjutnya melangkah ke jalur aplikasi industri, yakni pembuatan prototip *Fault Current Limiter (FCL)* untuk mendukung industri tenaga listrik nasional. FCL merupakan bentuk aplikasi langsung pelet STT. Sintesis pelet dilakukan dengan metode reaksi padatan dan kimia basah. Faktor kunci keberhasilan sintesis pelet STT dengan metode tersebut adalah proses perlakuan panas (kalsinasi dan *sintering*). Kualitas pelet, terutama sifat listriknya, ditingkatkan dengan menambahkan sejumlah kecil unsur perak (diperoleh pelet STT komposit) dan dengan proses pelelehan (diperoleh pelet STT bertekstur). Pelet STT dijadikan sebagai target pada pembuatan lapisan tipis STT dengan metode *unbalanced dc magnetron sputtering (UMBS)*. Aplikasi lapisan tipis STT belum dikembangkan di P3IB hingga saat ini.

Kata kunci : Litbang superkonduktor

ABSTRACT

REVIEW RESEARCH AND DEVELOPMENT ACTIVITIES OF HIGH T_c SUPERCONDUCTORS IN P3IB-BATAN. This is a brief of the research and development (R&D) of high T_c superconductors (HTS) in the advanced materials division, P3IB-BATAN. Those R&D activities were directed to the process mastery of synthesis and characterization of the bulk, the composite, and the thin film of HTS, i.e. Y-123 and Bi-2223 types for application. The HTS application was started by fabrication of a superconductivity phenomena kit for senior high school and university. The activities are being continued to the industrial application, i.e. the fabrication of fault current limiter (FCL) prototype to support the national electric power industries. FCL is a direct application of bulk-form of HTS. Bulk syntheses were performed by using solid state reaction and wet chemical reaction method. The key factors of the HTS bulk synthesis by those methods are the heat treatment processes (calcination and sintering process). The bulk quality especially electric properties, is improved by adding a small amount of silver elements (the composite-HTS bulk), and with a melting process (the textured-HTS bulk). The HTS bulk was placed as a target on the HTS thin film synthesis by using unbalanced dc magnetron sputtering (UMBS). Until this time the HTS thin film application has not been developed yet in P3IB.

Key words : Superconductor R & D

PENDAHULUAN

Kegiatan litbang superkonduktor T_c tinggi (STT) di Bidang Bahan Maju, Pusat Penelitian dan Pengembangan Iptek Bahan (P3IB)-BATAN secara formal dimulai pada tahun anggaran 1993/1994 dengan dukungan dana Riset Unggulan Terpadu-I (RUT-I) selama tiga tahun sampai dengan 1995/1996. Namun demikian penelitian pendahuluan telah dilakukan sejak

1990 pada oksida Y-Ba-Cu-O yang mana pada saat itu penelitian dan pengembangan superkonduktor sedang gencar dilakukan orang menyusul ditemukannya superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dengan suhu transisi kritis $T_c \approx 90$ K [1]. Ruang lingkup RUT-I cukup luas sesuai dengan judulnya, yakni : *Penelitian dan Pengembangan Komposit dan Lapisan Tipis Superkonduktor Suhu*

Tinggi, meliputi sintesis *bulk*, komposit dan lapisan tipis superkonduktor sistem Y-Ba-Cu-O dan Bi-Sr-Ca-Cu-O. Hasil penelitian tertuang sedikitnya dalam 26 makalah yang telah dipublikasi di berbagai prosiding dan jurnal nasional [2].

Setelah berakhirnya RUT-I, kegiatan litbang superkonduktor di P3IB dilanjutkan dengan program Riset Terpilih (RILIH) selama dua tahun anggaran mulai 1996/1997 hingga 1997/1998, dengan judul : *Mekanisme Peranan Dopan Pb dan Sb pada Pembentukan Fasa-2223 Superkonduktor Sistem Bi-Sr-Ca-Cu-O*. RILIH difokuskan pada oksida sistem Bi-Sr-Ca-Cu-O karena memiliki T_c lebih tinggi yakni sekitar 110 K. Sehingga diharapkan pemakaiannya akan lebih luas dibandingkan sistem Y-Ba-Cu-O. Walaupun proses sintesis Bi-Sr-Ca-Cu-O lebih sulit karena ada 6 jenis oksida penyusun yang direaksikan termasuk dopan PbO dan Sb₂O₃. Hasil program RILIH dipublikasikan pada prosiding nasional sebanyak 4 buah makalah [3-6].

Pada tahun 1997, peneliti P3IB berhasil lagi mendapatkan kepercayaan pemerintah untuk melanjutkan kegiatan litbang STT melalui program RUT-V selama tiga tahun anggaran hingga 1999/2000. Program penelitian ini berjudul : *Pembuatan Lapisan Tipis Superkonduktor Y-Ba-Cu-O dan Bi-Sr-Ca-Cu-O*. Hasil-hasilnya telah dipublikasikan pada beberapa prosiding sebanyak 3 buah makalah ilmiah [7-9].

Kegiatan-kegiatan litbang tersebut di atas diarahkan pada penguasaan teknik preparasi dan karakterisasi superkonduktor sistem Y-Ba-Cu-O (Y-123) dan Bi-Sr-Ca-Cu-O (Bi-2223 dan Bi-2212) dalam bentuk pelet, komposit Ag dan lapisan tipis. Metode karakterisasi cuplikan yang digunakan adalah *four point probe (FPP)* untuk pengukuran sifat listrik (T_c dan J_c), difraktometer sinar-X (XRD) dan difraktometer neutron resolusi tinggi (HRPD) masing-masing digunakan untuk analisis kuantitatif dan kualitatif fasa superkonduktor, mikroskop elektron sapuan (SEM) untuk mengamati struktur mikro, dan *energy dispersion analysis of x-rays (EDAX)* untuk mencacah komposisi konstituen. Secara umum hasil-hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa kuantitas fasa superkonduktor di dalam pelet dapat ditingkatkan dengan mengoptimalkan proses perlakuan panas dan menambahkan unsur-unsur dopan.

Dengan bermodalkan kemampuan teknik preparasi tersebut, mulai tahun anggaran 1999/2000 kegiatan litbang diarahkan pada riset terapan, yakni pembuatan alat peraga fenomena superkonduktivitas untuk sekolah menengah umum dan universitas. Tujuan litbang adalah melakukan kegiatan rancang bangun alat peraga fenomena superkonduktivitas dari pelet superkonduktor YBa₂Cu₃O_{7-x}. Alat peraga ini dirancang sebagai sarana untuk memperkenalkan superkonduktor kepada siswa sekolah menengah umum dan mahasiswa dengan cara-cara praktis, yakni melalui peragaan efek *Meissner*, pengukuran suhu transisi kritis, pengukuran

resistansi sebagai fungsi suhu dan pengukuran rapat arus kritis. Peragaan fenomena superkonduktor dipilih sebagai langkah awal pemasyarakatan superkonduktor, karena diharapkan dapat memicu dan memacu minat generasi muda untuk mempelajari bahan baru ini, sehingga mereka kelak menjadi pelaku-pelaku kegiatan baik dalam bidang litbang maupun dalam aplikasi industri [10].

Saat memasuki milenium ketiga (2001), litbang superkonduktor diprogramkan untuk memasuki jalur aplikasi industri. Program lima tahun pertama hingga 2004 adalah pembuatan prototip *Fault Current Limiter (FCL)*, suatu komponen listrik alternatif untuk mengontrol dan membatasi arus akibat adanya gangguan dalam suatu jaringan listrik [11-15]. Program riset ini diproyeksikan untuk mendukung industri tenaga listrik nasional.

Tujuan makalah ini adalah melakukan tinjauan tentang kegiatan penelitian dan pengembangan STT yang telah dan sedang dilakukan di P3IB. Makalah ini terdiri dari bagian pendahuluan, aplikasi, jenis-jenis STT, teknik preparasi, sifat diamagnetik, sifat listrik, struktur kristal, struktur mikro STT, alat peraga, FCL, dan bagian penutup, serta dilengkapi dengan daftar pustaka.

APLIKASI

Litbang STT dewasa ini telah mendekati kepada aplikasi komersial dalam berbagai bidang industri, yakni bidang elektronika, energi, transportasi, kedokteran, dan lain-lain. Aplikasi superkonduktor T_c tinggi antara lain untuk :

1. Kabel transmisi daya. Saat ini diperkirakan lima puluh persen energi listrik yang dibangkitkan hilang sia-sia ketika ditransmisikan ke konsumen. Kehilangan energi listrik tersebut akan sangat kecil (mendekati nol persen) jika digunakan kabel superkonduktor [16].
2. Magnet superkonduktor. Dengan superkonduktor dimungkinkan untuk membuat magnet yang sangat kuat (hingga 50 Tesla) jauh lebih besar dibandingkan dengan medan magnet yang dibangkitkan oleh elektromagnet (solenoid tembaga) untuk ukuran fisik yang sama. Untuk membangkitkan medan 50 Tesla, solenoid tembaga mengkonsumsi daya kira-kira 3 MW dengan sirkulasi pendingin air kira-kira 2000 liter per menit, padahal magnet superkonduktor membutuhkan 10 kW saja dengan pendingin nitrogen cair [17].
3. Alat pendeteksi sinyal magnetik yang sangat lemah dari jantung dan otak manusia. Dengan alat ini (*magnetic resonance imaging*) penyakit-penyakit pada kedua organ vital tersebut dapat didiagnosis. Disamping itu, dari bahan superkonduktor dapat dibuat sensor magnetik untuk penelitian bahan (*superconducting quantum interference devices*) [18].

4. Alat penyimpan energi magnetik (*superconducting magnetic energy storage*). Energi listrik disimpan dalam superkonduktor untuk digunakan kembali pada saat diperlukan misalnya pada waktu terjadi fluktuasi tegangan akibat beban puncak (*peak loading*) [16].
5. Komputer yang sangat cepat (*ultrahigh-speed computer*). Bahan superkonduktor dapat digunakan untuk melakukan fungsi-fungsi pelogikaan dan penyimpanan data dalam komputer didasarkan pada konsep *Josephson junction*. *Junction* ini terdiri dari lapisan isolator tipis yang diletakkan diantara dua pelat superkonduktor. Karakteristik arus-tegangan pada *Josephson junction* cocok untuk elemen memori dengan *switching times* berorde 10 ps (10^{-11} detik) [17].
6. Kereta api dengan bantalan udara (*magnetic levitation train*), dan pirodo tanpa gesekan (*frictionless magnetic bearings*). Kedua jenis aplikasi ini didasarkan pada efek *Meissner*, dimana superkonduktor dapat melayang di udara akibat gaya tolak medan magnet [17].
7. Alat pemutus arus gagal (*fault current limiter* disingkat *FCL*). *FCL* ini merupakan suatu komponen pelindung yang sangat penting dalam sistem jaringan listrik, memanfaatkan karakteristik non-linear yang ditampilkan oleh bahan ketika terjadi transisi dari keadaan superkonduksi ke keadaan normal. *FCL* berperan seperti sebuah saklar otomatis yang beroperasi sangat cepat tanpa suatu alat kontrol dan mampu mereduksi arus transien yang besar [16].
8. Detektor radiasi. Dengan diserapnya foton (radiasi) oleh superkonduktor, maka tercipta partikel *quasi*, kemudian partikel *quasi* tersebut dialirkan melalui *tunnel junction SIS* (superkonduktor-isolator-superkonduktor). Prinsip tersebut serupa dengan prinsip yang dikembangkan pada detektor semikonduktor, perbedaannya terletak pada fakta bahwa celah pita energi superkonduktor berorde meV sedangkan celah pita energi semikonduktor berorde eV ($=10^3$ meV). Dengan demikian resolusi energi detektor superkonduktor jauh lebih baik daripada detektor semikonduktor [19].

Diperkirakan pada tahun 2010 total pemasaran *STT* dalam berbagai bentuk aplikasinya akan mencapai angka US \$ 76 milyar dan volume pemasaran tersebut akan bertambah terus hingga US \$ 244 milyar pada tahun 2020 [16]. Aplikasi *STT* tampaknya akan memiliki dampak teknologi dan ekonomi yang luas di masa datang. Oleh karena itu, ilmu pengetahuan dan teknologi bahan *STT* perlu dikuasai agar kita mampu memenuhi kebutuhan pasar dalam negeri. Bahan baku untuk pembuatan *STT*, yakni oksida tanah jarang Y_2O_3 terdapat di dalam mineral tambang senotim yang dihasilkan oleh PT. Timah di Pulau Bangka, Pulau Belitung, dan Pulau Singkep sebagai produk samping penambangan. Jadi sebetulnya sangat memungkinkan bagi kita untuk memproduksi sendiri oksida tanah jarang tersebut.

JENIS-JENIS STT

Pada tahun 1987, kelompok peneliti di Alabama dan Houston yang dikoordinasikan oleh K.Wu dan P. Chu, menemukan superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dengan $T_c = 92$ K. Ini adalah suatu penemuan yang penting karena berarti bahwa dunia untuk pertama kali menyaksikan adanya superkonduktor dengan suhu kritis di atas suhu nitrogen cair-pendingin yang harganya jauh lebih murah dari pada helium cair.

Pada awal tahun 1988, ditemukan superkonduktor oksida Bi-Sr-Ca-Cu-O dan Tl-Ba-Ca-Cu-O berturut-turut dengan $T_c = 110$ K dan 125 K. Oksida yang disebut terakhir walaupun memiliki T_c tinggi, tidak dapat diaplikasikan karena beracun. Sejak saat itu, beberapa kelompok peneliti mengklaim mereka telah mendapatkan bahan dengan T_c yang lebih tinggi lagi, tetapi ternyata tidak reproduibel atau tidak berhasil dikonfirmasi oleh Laboratorium lain. Beberapa keluarga *STT* yang telah terbukti reproduibel ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Daftar keluarga *STT* yang telah terbukti reproduibel [20].

Rumus Kimia	Sistem	Fasa	T_c (K)
$YBa_2Cu_3O_{7-x}$	YBCO	Y-123	92
$GdBa_2Cu_3O_{7-x}$	GBCO	Gd-123	94
$NdBa_2Cu_3O_{7-x}$	NBCO	Nd-123	96
$BiSr_2CaCu_2O_7$	BSCCO	Bi-1212	102
$Bi_2Sr_2CuO_6$	BSCCO	Bi-2201	22
$Bi_2Sr_2CaCu_2O_8$	BSCCO	Bi-2212	90
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	BSCCO	Bi-2223	110
$TlBa_2CaCu_2O_7$	TBCCO	Tl-1212	82
$TlBa_2Ca_2Cu_3O_9$	TBCCO	Tl-1223	110
$TlBa_2Ca_3Cu_4O_{11}$	TBCCO	Tl-1234	120
$Tl_2Ba_2CuO_6$	TBCCO	Tl-2201	90
$Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$	TBCCO	Tl-2212	110
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	TBCCO	Tl-2223	125
$HgBa_2CuO_4$	HBCCO	Hg-1201	97
$HgBa_2CaCu_2O_7$	HBCCO	Hg-1212	128
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$	HBCCO	Hg-1223	134-64
$Hg_2Ba_2Ca_3Cu_4O_{12}$	HBCCO	Hg-2234	114
$CuBa_2Ca_3Cu_4O_{11}$	CBCCO	Cu-1234	120
$Cu_2Ba_2Ca_3Cu_4O_{12}$	CBCCO	Cu-2234	113
$Cu_2Ba_2Ca_4Cu_5O_{14}$	CBCCO	Cu-2245	<110

PREPARASI

Hasil yang telah dicapai dari kegiatan penelitian dan pengembangan *STT* di P3IB adalah suatu *paket teknologi* tentang teknik pembuatan : pelet *STT* (*Y-123* dan *Bi-2223*), komposit, lapisan tipis, dan tekstur *STT*. Pelet *STT* dibuat dengan metode reaksi padatan dan reaksi kimia basah.

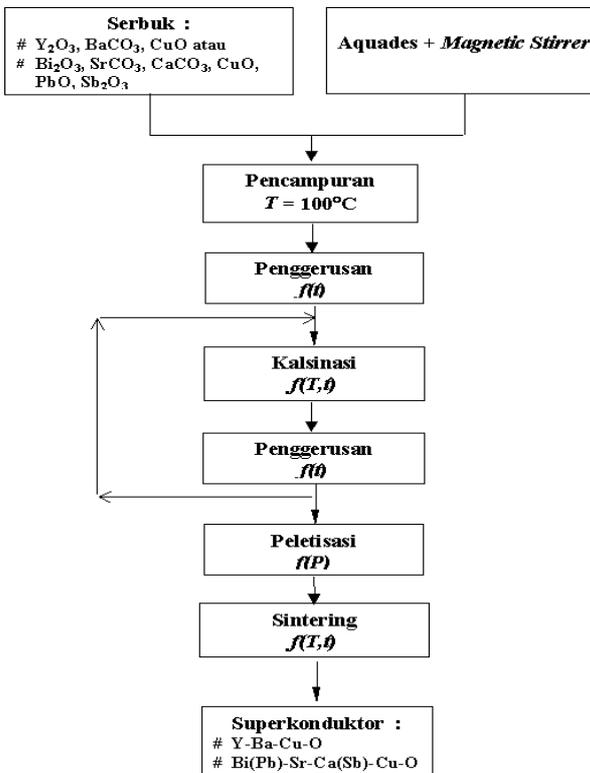
Metode Reaksi Padat

Untuk preparasi pelet *Y-123* [21] disiapkan oksida-oksida dalam bentuk serbuk : Y_2O_3 , $BaCO_3$, dan

CuO masing-masing dengan kemurnian 99,9 %. Ketiga jenis oksida tersebut akan direaksikan sehingga diperoleh senyawa $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y-123). Jadi agar senyawa Y-123 terbentuk diperlukan $\frac{1}{2}$ mol Y_2O_3 , 2 mol $BaCO_3$ dan 3 mol CuO . Sedangkan untuk preparasi pelet Bi-2223 [3-6] dibutuhkan Bi_2O_3 , $SrCO_3$, $CaCO_3$, CuO , dan dopan PbO dan Sb_2O_3 masing-masing dengan kemurnian 99,9 %. Unsur dopan dibutuhkan agar fasa Bi-2223 mudah terbentuk, struktur kristal lebih stabil, dan suhu onset meningkat. Keenam jenis oksida tersebut direaksikan sehingga diperoleh oksida baru $(Bi,Pb)_2Sr_2(Ca,Sb)_2Cu_3O_{10}$ (Bi-2223). Agar senyawa Bi-2223 terbentuk diperlukan 1,84 mol Bi_2O_3 , 2,0 mol $SrCO_3$, 1,93 mol $CaCO_3$, 3,06 mol CuO , dan dopan 0,34 mol PbO dan 0,1 mol Sb_2O_3 .

Tabel 2. Parameter kalsinasi, sintering dan heat treatment (laju pemanasan/pendinginan) pada waktu preparasi STT metode reaksi padat.

STT	Kalsinasi		Sintering		Heat Treatment (°C/jam)
	Suhu (°C)	Periode (jam)	Suhu (°C)	Periode (jam)	
Y-123	900	4	940	10	60
Bi-2223	820	24	855	100	360



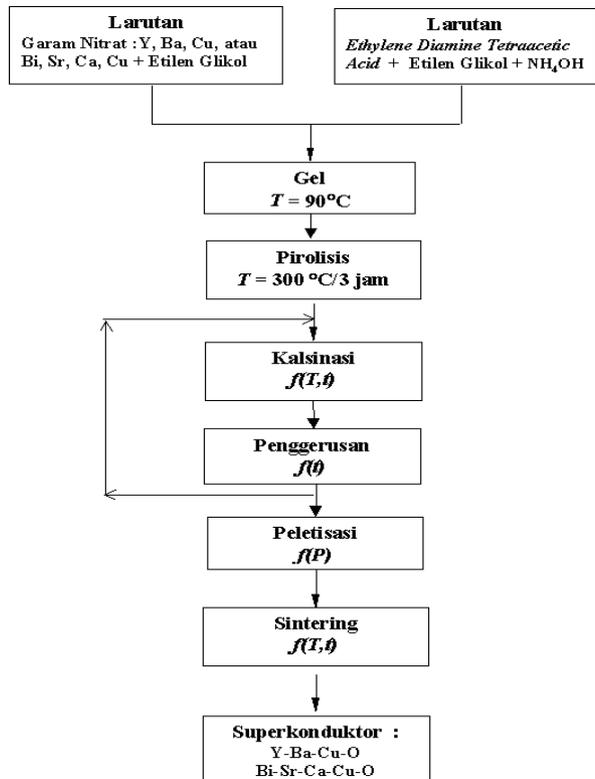
Gambar 1. Diagram alir pembuatan superkonduktor dengan teknik reaksi padat, dimana T , P , dan t berturut-turut adalah suhu, tekanan, dan waktu.

Penimbangan bahan dasar oksida-oksida baik untuk Y-123 maupun Bi-2223 dilakukan dengan ketelitian hingga tiga atau empat angka di belakang koma.

Selanjutnya dilakukan pencampuran melalui proses pengadukan dan penggerusan dengan mortar agate atau ball mill. Pencampuran oksida-oksida tersebut bisa juga dilakukan dengan melarutkan ke dalam aquades, kemudian diaduk menggunakan magnetic stirrer sambil dipanaskan pada suhu di bawah 100°C. Setelah kering baru dilakukan penggerusan dengan mortar agate atau ball mill. Selanjutnya proses kalsinasi, penggerusan, peletisasi, dan sintering dengan proses perlakuan panas tertentu yang menyertainya seperti ditunjukkan pada Tabel 2, dan Gambar 1 adalah diagram alir proses preparasi STT dengan metode reaksi padatan.

Metode Reaksi Kimia Basah

Salah satu metode reaksi kimia yang banyak digunakan dalam preparasi STT adalah metode sol gel dengan media asam ethylene-diaminetetraacetit acid (EDTA) [2]. EDTA adalah senyawa ligan yang dapat mengikat sebagian besar logam. Untuk preparasi Y-123, disediakan garam nitrat : $Y(NO_3)_3$, $Ba(NO_3)_2$, dan $Cu(NO_3)_2$, dengan perbandingan mol kation $Y : Ba : Cu = 1:2:3$. Sedangkan untuk preparasi Bi-2223, disediakan garam nitrat : $Bi(NO_3)_3$, $Pb(NO_3)_2$, $Sb(NO_3)_2$, $Ca(NO_3)_2$, $Sr(NO_3)_2$, dan $Cu(NO_3)_2$, dengan perbandingan mol kation $Bi:Pb:Sr:Ca:Sb:Cu=1,84:0,34:2,0:1,93:0,1:3,06$



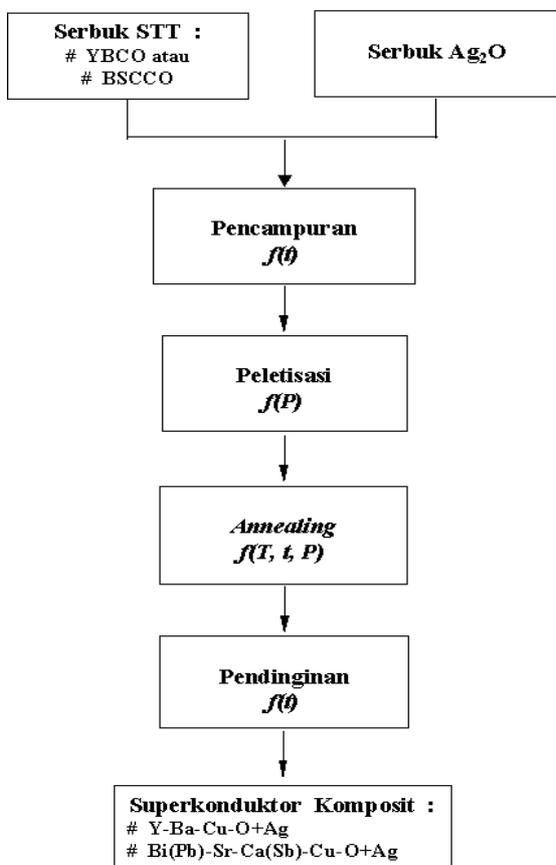
Gambar 2. Diagram alir pembuatan superkon-duktor dengan teknik sol gel, dimana T , P , t berturut-turut adalah suhu, tekanan, dan waktu.

Garam-garam nitrat tersebut dicampurkan di dalam pelarut etilen glikol, larutan ini selanjutnya disebut larutan-1. Secara simultan, EDTA juga dilarutkan dengan

etilen glikol dan pH larutan diatur pada 8,0-8,2 dengan menambahkan amonium hidroksida (NH_4OH), larutan yang kedua ini selanjutnya disebut larutan-2. Selanjutnya kedua larutan dicampurkan sedikit demi sedikit secara kontinyu. Larutan ini dipanaskan pada $90^\circ C$ selama 1-3 jam sampai diperoleh *precursor* berbentuk *gel* (cairan kental). Selanjutnya *precursor* didekomposisi pada $300^\circ C$ selama 2-3 jam hingga didapat aglomerat-aglomerat yang lunak dan berpori. Langkah selanjutnya adalah penggerusan dengan *mortar agate* atau *ball mill*, kalsinasi, penggerusan kembali, peletisasi, dan *sintering* dengan proses perlakuan panas tertentu yang menyertainya seperti ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 2 adalah diagram alir proses preparasi superkonduktor dengan teknik sol gel.

Teknik Pembuatan Komposit STT

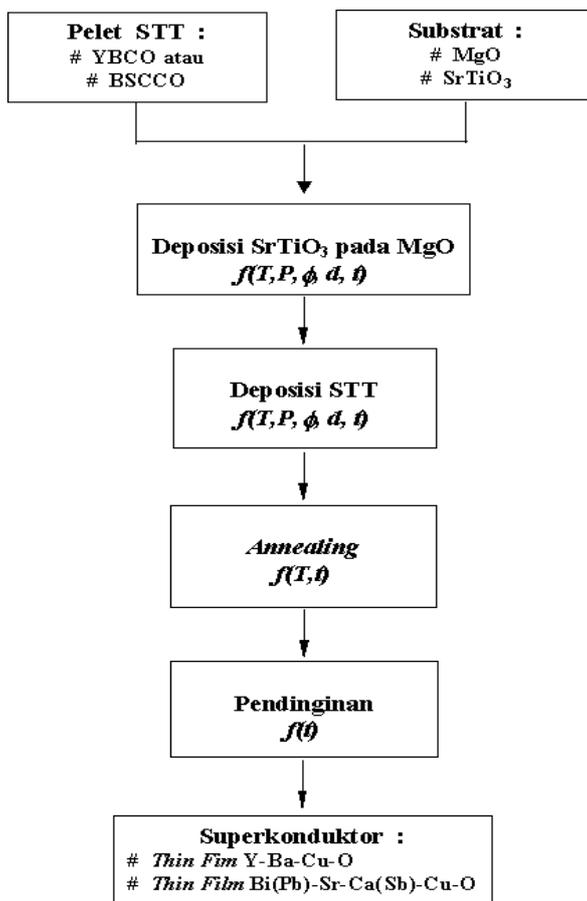
Untuk dapat digunakan dalam pemakaian praktis, STT selain harus memiliki T_c dan J_c yang tinggi juga mempunyai sifat mekanik yang baik. Telah diketahui bahwa STT sangat getas (rapuh), kurang tangguh dan J_c rendah. Masalah tersebut dicoba diatasi dengan menambahkan sejumlah kecil unsur Ag ke dalam STT [2,6]. Ag mengisi batas butir STT, sedemikian sehingga batas-batas butir *terkopel* lebih kuat, mengakibatkan harga J_c meningkat. Gambar 3 adalah diagram alir pembuatan superkonduktor STT komposit perak.



Gambar 3. Diagram alir pembuatan superkonduktor STT komposit perak, dimana T , P , t berturut-turut adalah suhu, tekanan, dan waktu.

Teknik Pembuatan Lapisan Tipis STT

Lapisan tipis STT dibuat dengan metode *unbalanced dc magnetron sputtering (UMBS)*, yang merupakan penyempurnaan dari metode *sputtering* [22]. Target berupa pelet STT ditempatkan pada katoda, maka di antara pelat paralel anoda dan katoda terbentuk plasma akibat *glow discharge* pada target. Target STT mengalami *discharge* karena panas yang dibangkitkan oleh *dc power* sehingga pada ruangan antara katoda dan anoda terbentuk molekul-molekul netral, elektron-elektron, ion-negatif dan ion positif, dan partikel bebas yang kemudian terdepositasi pada substrat MgO dengan penyangga lapisan $SrTiO_3$. Substrat tersebut ditempelkan pada *substrate table* yang sekaligus berfungsi sebagai anoda. Lapisan tipis STT yang terbentuk pada substrat akan mengalami kekurangan oksigen. Oleh karena itu setelah proses deposisi selesai, dilanjutkan dengan *annealing* secara *insitu* di dalam lingkungan gas oksigen. Diagram alir proses pembuatan lapisan tipis STT ditunjukkan pada Gambar 4.



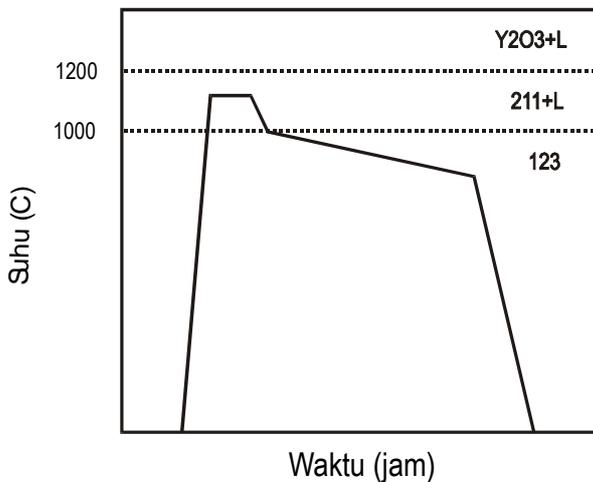
Gambar 4. Diagram alir pembuatan *thin film* STT dengan metode *UMBS*, dimana T, P, ϕ, d, t berturut-turut adalah suhu, tekanan gas, fluksi gas, jarak target-substrat, dan waktu.

Teknik Penumbuhan Tekstur Y-123

Rapat arus kritis J_c pada bahan Y-123 hasil preparasi dengan metode reaksi padatan, kimia basah,

dan komposit Ag, masih lebih rendah dari 10^4 A/cm², dengan demikian masih belum memadai untuk aplikasi. Rendahnya J_c adalah karena lemahnya ikatan (*link*) antara batas-batas butir kristal. Untuk mengatasi masalah tersebut, maka dilakukan penumbuhan *tekstur* melalui proses pelelehan. Teknik ini cukup efektif dalam memperkuat ikatan (*link*) antara butir melalui pengorientasian butir-butir kristalnya dan J_c yang lebih besar dapat dicapai [23]. Dengan demikian proses pelelehan ini berpeluang sangat besar bagi aplikasi superkonduktor dalam bentuk pelet Y-123.

Ilustrasi skematis proses pelelehan Y-123 ditunjukkan pada Gambar 5, dimana cuplikan Y-123 hasil proses *sintering* (HPS) di bakar di dalam tungku *Thermolyne F48050-26* pada 1100°C selama 0,2 jam. Selama periode penahanan tersebut, cuplikan Y-123 meleleh dan terurai menjadi Y-211 (Y_2BaCuO_5) dan fasa cair L. Cuplikan kemudian didinginkan ke 1000°C dengan laju 400°C/jam. Angka 400°C/jam adalah laju pendinginan tercepat yang bisa dicapai tungku tersebut. Selanjutnya cuplikan didinginkan secara lambat ke 900°C dengan laju 10°C/jam dan kemudian didinginkan hingga suhu ruang (laju 60°C/jam) dalam lingkungan udara. Selama proses pendinginan dari 1000°C, Y-211 dan fasa cair L bereaksi membentuk fasa superkonduktor Y-123.



Gambar 5. Ilustrasi skematis proses pelelehan superkonduktor Y-123.

Sifat Diamagnetik

Suatu bahan disebut superkonduktor jika menampilkan sifat diamagnetik, yakni induksi magnet, $B=0$ di dalam superkonduktor. Ketika bahan superkonduktor didinginkan hingga di bawah T_c , maka kuat medan magnet di dalam superkonduktor menjadi nol, artinya fluksi magnetik ditolak dari bagian dalam superkonduktor. Efek ini disebut efek *Meissner-Ochsenfeld*, diberi nama sesuai nama penemunya. Pengujian efek *Meissner* merupakan teknik karakterisasi yang paling mudah dan cepat. Karakterisasi cuplikan pada beberapa laporan tentang preparasi Y-123 dan Bi-2223 cukup dilakukan dengan uji efek *Meissner*

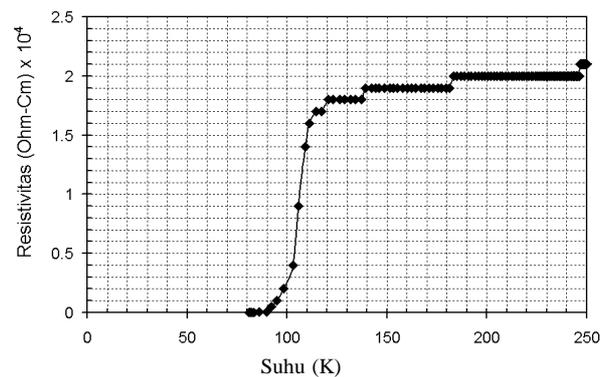
tersebut. Tampak pada Gambar 6, magnet Nd-Fe-B berbentuk kubus melayang setinggi ± 3 mm di atas pelet Y-123.



Gambar 6. Efek Meissner pada Y-123, tampak magnet Nd-Fe-B melayang di atas pelet Y-123

Sifat Listrik

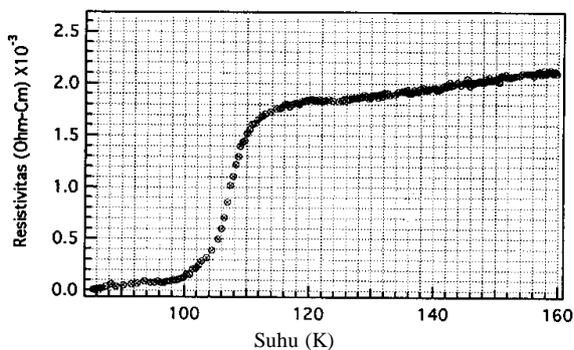
Selain menampilkan sifat diamagnetik, superkonduktor juga memiliki resistivitas $\rho=0$ pada suhu $T \leq T_c$. Resistivitas nol, teramati pada suhu di bawah suhu kritis T_c . Resistivitas nol terjadi karena elektron-elektron konduksi, yang memiliki karakter saling tolak-menolak antara sesamanya dalam keadaan normal, mentransformasikan dirinya menjadi berpasangan-pasangan pada $T \leq T_c$. Ketika didinginkan dari suhu ruang, STT biasanya menampilkan sifat logam sebelum terjadinya transisi kritis dan fasa superkonduktif homogen terbentuk pada suhu $T_c = 80-92$ K dan $T_c = 10-110$ K, berturut-turut pada Y-123 dan Bi-2223 [2-6].



Gambar 7. Grafik hubungan antara resistivitas dalam Ohm-cm terhadap suhu dalam Kelvin dengan suhu transisi kritis, $T_c= 89$ K pada Y-123 hasil pelelehan.

Suhu transisi kritis Y-123 bisa menyusut hingga 80 K dari keadaan ideal 92 K karena ada fasa pengotor di dalam cuplikan, antara lain berupa fasa Y-123 yang kekurangan oksigen, dan fasa hijau Y-211. Demikian pula suhu transisi kritis pada Bi-2223 dapat berkurang

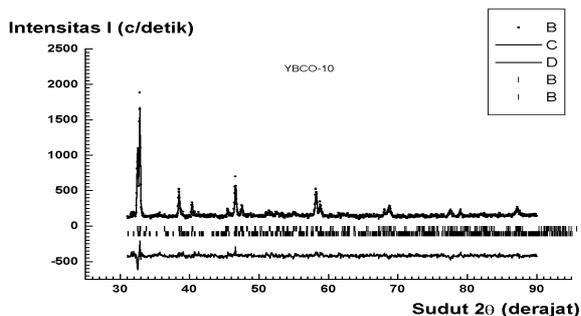
hingga 10 K dari keadaan ideal 110 K, akibat kehadiran fasa *Bi-2212*, dan *Bi-2201*. Gambar 7 dan 8 adalah grafik hubungan antara resistivitas terhadap suhu berturut-turut pada *Y-123* dan *Bi-2223*.



Gambar 8. Hubungan antara resistivitas dalam Ohm-cm dan suhu dalam Kelvin pada cuplikan oksida *Bi-2223* dengan doping *Pb*.

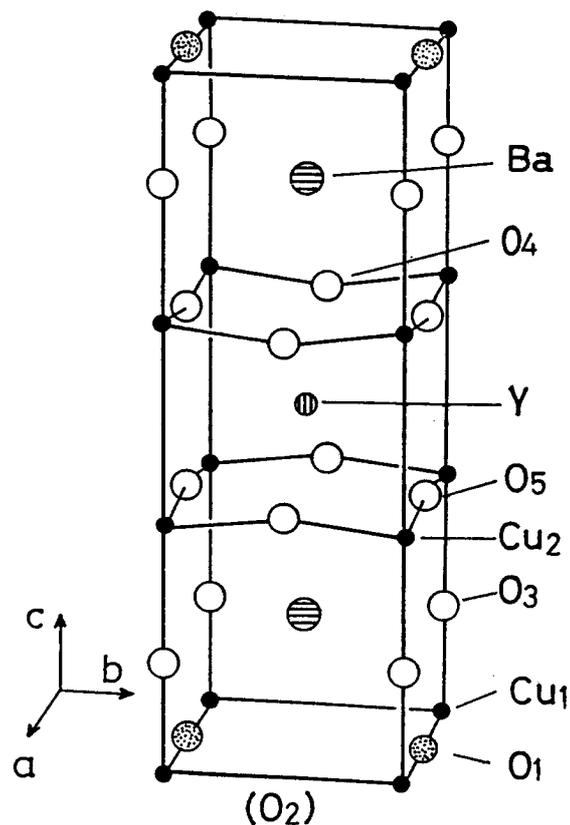
STRUKTUR KRISTAL

Struktur kristal bahan dianalisis dengan metode Rietveld berdasarkan pada data difraksi sinar-x atau difraksi neutron. Dengan metode Rietveld, fasa-fasa yang terbentuk dapat diidentifikasi dan kemudian ditentukan jumlah kandungannya di dalam cuplikan. Sehingga besaran-besaran seperti T_c , jenis dan kadar fasa-fasa yang ada dan parameter-parameter preparasi (kalsinasi, sintering, dan lain-lain), dapat dikorelasikan. Gambar 9 adalah profil pola difraksi sinar-x hasil analisis dengan metode Rietveld pada *Y-123* hasil pelelehan, cuplikan terdiri dari dua fasa yakni *Y-123* dan fasa hijau *Y-211*.

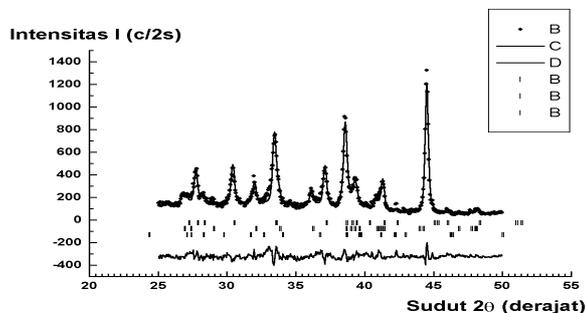


Gambar 9. Adalah profil pola difraksi sinar-x hasil analisis dengan metode Rietveld pada *Y-123* hasil proses pelelehan dengan parameter input dari 99,6% *Y-123* dan 0,4% *Y-211*, $R_{wp} = 9,94$; dan $R_p = 7,88$ [23].

Y-123 memiliki dua bentuk struktur, yakni struktur ortorombik yang superkonduktif (*Y-123-S*) dan struktur tetragonal yang semikonduktif (*Y-123-T*), sedangkan *Y-211* adalah isolator. Pada *Y-123-S*, sumbu-*a* dan sumbu-*b* pada bidang *CuO* berturut-turut diisi oleh atom oksigen dan kekosongan, menyebabkan $a \neq b$. Sedangkan pada *Y-123-T*, sumbu-*a* dan sumbu-*b* bidang *CuO* tidak ditempati oksigen. Struktur kristal *Y-123-S* ditunjukkan pada Gambar 10.



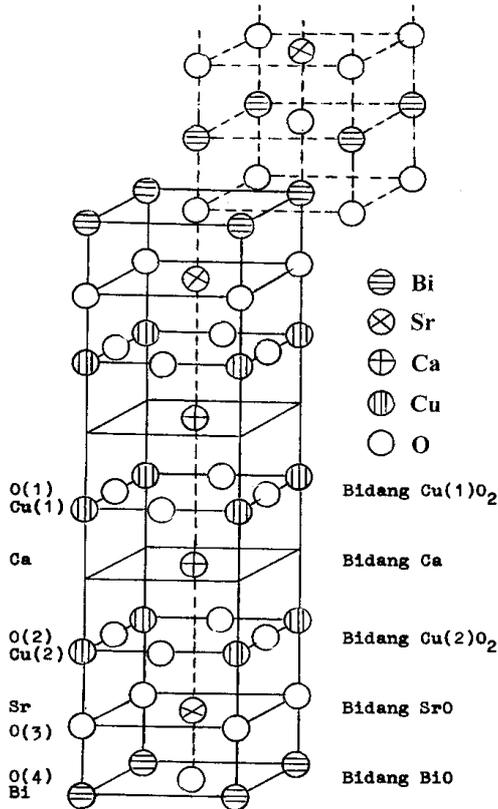
Gambar 10. Struktur kristal *Y-123-S*, sistem kristal ortorombik, grup ruang *Pmmm*, No.47, parameter kisi : $a = 3,886(1) \text{ \AA}$, $b = 3,825(1) \text{ \AA}$ dan $c = 11,667(7) \text{ \AA}$.



Gambar 11. Profil pola difraksi sinar-x hasil analisis dengan metode Rietveld pada *Bi-2223* komposit *Ag*, cuplikan terdiri dari 66,56% *Bi-2223*; 23,80% *Bi-2212*; 6,74% *Bi-2201*; 2,79% *Ag*; dan 0,12% *Ag2O*, dengan $R_{wp} = 11,14$ [6].

Gambar 11 adalah profil pola difraksi sinar-x hasil analisis dengan metode Rietveld pada *Bi-2223* komposit *Ag*, cuplikan terdiri dari *Bi-2223*, *Bi-2212*, *Bi-2201*, *Ag*, dan *Ag2O*. Pembawa muatan dalam *STT* adalah lubang-lubang yang terdistribusi pada bidang *CuO2*. Fakta menunjukkan bahwa seluruh fasa-fasa *STT* memiliki bidang *CuO2* dalam struktur kristalnya. *Bi-2212* serupa dengan *Y-123* memiliki dua bidang *CuO2*, sedangkan pada struktur kristal *Bi-2223* terdapat tiga bidang *CuO2*. Bidang *CuO2* membentuk piramida *CuO5*, pada *Y-123* titik puncak piramida (*apical*) adalah atom oksigen pada

bidang BaO dan *apical* pada $Bi-2212$ dan $Bi-2223$ adalah oksigen pada bidang SrO (Gambar 12).



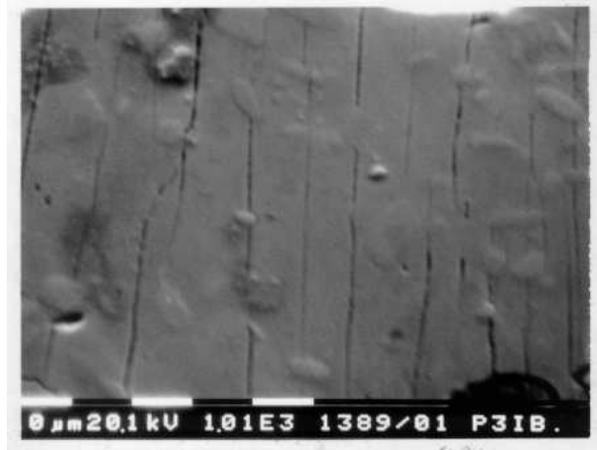
Gambar 12. Struktur kristal $Bi-2223$, sistem kristal tetragonal, grup ruang $I4/mmm$, No.139, parameter kisi : $a = b = 3,820(2) \text{ \AA}$ dan $c = 37,15(2) \text{ \AA}$.

STRUKTUR MIKRO

Gambar 13 dan 14 berturut-turut adalah struktur mikro STT diperoleh dengan mikroskop elektron sapuan (SEM) pada $Y-123$ hasil proses *sintering* dan $Y-123$ hasil pelelehan. Tampak jelas pada gambar tersebut bahwa dengan pelelehan, butir-butir kristal terorientasi ke suatu arah tertentu, yakni arah sejajar bidang (a, b). Oleh karena itu rapat arus kritis J_c meningkat dari $2,57 \times 10^2 \text{ A/cm}^2$ pada $Y-123$ produk *sinter* menjadi $3,43 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ pada $Y-123$ hasil pelelehan.



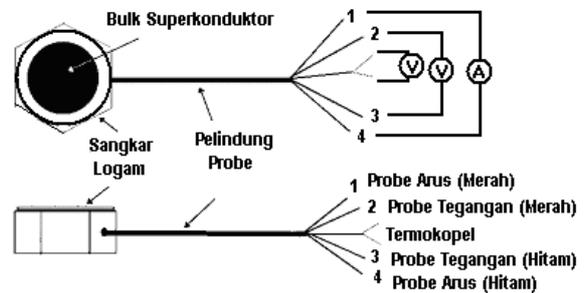
Gambar 13. Struktur mikro pada $Y-123$ hasil proses *sintering*



Gambar 14. Struktur mikro pada $Y-123$ hasil proses pelelehan dengan laju pendinginan 20°C/jam . Daftar keluarga STT yang telah terbukti reproduibel [20].

ALAT PERAGA (KIT)

Tujuan pembuatan alat peraga (*kit*) fenomena superkonduktivitas adalah untuk memperkenalkan superkonduktor kepada siswa sekolah menengah umum dan mahasiswa, yakni melalui pertunjukan beberapa fenomena fisis yang terjadi pada superkonduktor, antara lain efek *Meissner*, suhu transisi kritis T_c , dan rapat arus kritis J_c .



Gambar 15. Skema *kit*, (atas) tampak atas dan (bawah) tampak samping, dimana angka 1, 2 dan 3 berturut-turut adalah *probe* termokopel, *probe* tegangan dan *probe* arus.

Bahan dan peralatan pendukung yang diperlukan untuk mengoperasikan *kit* adalah nitrogen cair, voltmeter, sumber arus dan amperemeter. Alat ini diharapkan dapat menjadi jembatan, khususnya bagi para siswa SMU dan mahasiswa untuk mengenali apa itu superkonduktor. Alat peraga tersebut terdiri dari tiga komponen utama, yakni : pelet $Y-123$, *probe* empat titik, termokopel dan sangkar logam (*casing*).

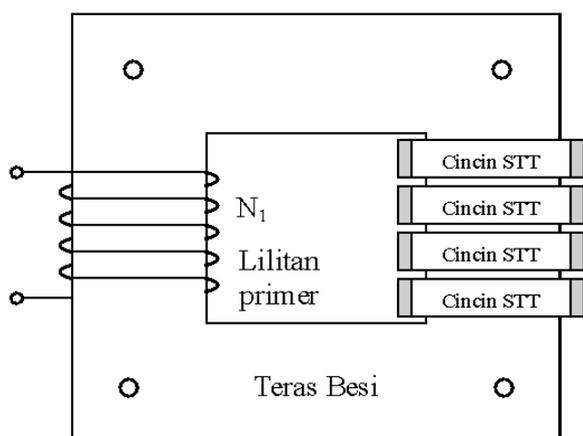
FAULT CURRENT LIMITTER (FCL)

Salah satu bentuk aplikasi *bulk Y-123* adalah sebagai pembatas arus gagal (FCL). FCL adalah pengontrol arus yang dirancang untuk merespon dan menyerap gangguan daya yang tidak diharapkan dalam suatu jaringan listrik, sedemikian sehingga kehilangan

daya listrik atau kerusakan peralatan di dalam jaringan tersebut dapat dihindarkan. FCL dipasang terutama pada sistem transmisi dan distribusi di daerah-daerah yang padat populasinya. Dengan dipasangnya FCL pada sistem jaringan tersebut maka kualitas keselamatan (*safety*), dan keandalan (*reliability*) sistem meningkat.

FCL cocok (*compatible*) dengan alat-alat pelindung yang sudah ada, dan arus maksimum yang diijinkan dapat disetel, ini berarti fleksibilitas sistem akan lebih besar, dan oleh karenanya dengan FCL bisa memperpanjang usia pakai sistem transmisi dan distribusi, yang berarti menurunkan biaya investasi. Suatu *system integrator team* di AS yang bernama *Lockheed Martin* [16] menaksir bahwa FCL akan dapat menciptakan suatu pasar domestik yang potensial berkisar antara 3-7 milyar dolar AS dalam limabelas tahun mendatang.

Tujuan penelitian adalah mengaplikasikan pelet $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y-123) hasil proses pelelehan pada pembatas arus gagal FCL model induktif yang memenuhi kriteria aman dan handal. Untuk itu dibuat rancang bangun (*design and construction*) FCL skala kecil, kemudian dikembangkan menjadi suatu prototipe FCL dan selanjutnya dilakukan uji unjuk kerja. Kriteria FCL yang aman dan handal adalah jika FCL tersebut mampu membatasi arus gagal tanpa *overvoltage* dan memiliki mode operasi *self-switching*, yakni transisi dari keadaan superkonduktor ke normal dan kembali ke keadaan superkonduktor lagi berlangsung otomatis segera setelah kondisi gagal berlalu. Agar karakteristik peralihan keadaan tersebut bisa berlangsung, maka diperlukan media rangkaian listrik, dalam hal ini dipilih topologi transformator, yakni sebuah transformator dengan lilitan sekunder dari superkonduktor berupa cincin dan lilitan primer dari kawat tembaga biasa, seperti ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Diagram skema FCL berdasarkan topologi transformator.

PENUTUP

Sesungguhnya superkonduktor T_c tinggi (STT) ini masih merupakan sesuatu yang baru dan di dalamnya masih menyimpan misteri yang belum terungkap dengan

jelas. Dengan perkembangan yang cepat dalam bidang ini, diharapkan bahwa pada suatu hari nanti akan ditemukan superkonduktor yang dapat dioperasikan pada suhu ruang. Sehingga kita mungkin akan menjadi saksi terjadinya revolusi industri dengan skala dan dampak yang jauh lebih besar dibandingkan dengan revolusi industri yang terjadi sebelumnya yakni pada waktu semikonduktor ditemukan.

DAFTARACUAN

- [1]. J.G. BEDNORZ AND K.A. MULLER, *Z. Phys.* **B 64**, (1986) 189.
- [2]. WURYANTO, *Kumpulan Hasil Penelitian Kelompok Superkonduktor, Riset Unggulan Terpadu-I*, Pusat Penelitian Sains Materi, BATAN, Kawasan Puspiptek Serpong, 19 Maret 1996.
- [3]. E. SUKIRMAN, PRASUAD, DAN WURYANTO, *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, PPNY-BATAN, Yogyakarta, 8-9 Juli 1997.
- [4]. ENKIR SUKIRMAN, P. SULISWORO, YUSTINUS, ARI HANDAYANI, DAN PURWANTO, *Prosiding Seminar Nasional Fisika Terapan dan Lingkungan*, P3FT-LIPI, Puspiptek Serpong, 8 Desember 1997.
- [5]. ENKIR SUKIRMAN, PUJI SULISWORO, W. PRASUAD, DAN WURYANTO, *Proceedings The 1997 Workshop on The Utilization of Research Reactors*, BATAN-Indonesia, STA-Japan, JAERI-Japan, Bandung, November 6-13, (1997).
- [6]. E. SUKIRMAN, W. ARI ADI, P. SULISWORO DAN W. PRASUAD, *Proceedings The 1998 Workshop on The Utilization of Research Reactors*, BATAN-Indonesia, STA-Japan, JAERI-Japan, Yogyakarta, Februari 8-14, (1999).
- [7]. JHONSIUS M., EKO, H. SUDJONO, T. SARAGI, IMAM S., GRACE S., M. BUDIMAN, DAN M. BARMAWI, *Proceedings Industrial Electronics Seminar 1999*, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, October 27-28, (1999).
- [8]. JHONSIUS M., EKO, H. SUDJONO, T. SARAGI, IMAM S., WURYANTO, DAN M. BARMAWI, *Penumbuhan Film Tipis Bi-Sr-Ca-Cu-O pada Substrat Si(100) dengan Lapisan Penyangga SrTiO₃(100)*, Laporan Teknis, Jurusan Fisika ITB, Bandung, (2000).
- [9]. WURYANTO, GRACE T.J. S., SUPARDI, E. SUKIRMAN, W. PRASUAD, YUSTINUS, *Prosiding Konperensi Nasional I*, Jaringan Kerjasama Kimia Indonesia (JASA KIAI), Yogyakarta, 15-16 Juli 1997.
- [10]. E. SUKIRMAN, W. ARI ADI, P. SULISWORO, DIDIN S. WINATAPURA, WURYANTO, P. PURWANTO, DAN YUSTINUS, *Pembuatan Alat Peraga Fenomena Superkonduktivitas untuk*

- Sekolah Menengah Umum dan Universitas,
Laporan Teknis BBM, P3IB, BATAN, Serpong,
(2000).
- [11]. M. JOO AND T.K. KO, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **6**, (1996), 62.
 - [12]. V. MEEROVICH, V.L. SOKOLOVSKY, M. SLONIM, G.E. SHTER AND G.S. GRADER, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3**, (1993), 3033.
 - [13]. P. TIXADOR, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **4**, (1994), 190.
 - [14]. W. PAUL, T.H. BAUMANN, J. RHYNER AND F. PLATTER, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5**, (1995), 1059.
 - [15]. D.W.A. WILLEN AND J.R. CAVE, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5**, (1995), 1047.
 - [16]. D. LARBALESTIER, R.D. BLAUGHER, R.E. SCHWALL, R.S. SOKOLOWSKI, M. SUENAGA, J.O. WILLIS, *Power Applications of Superconductivity in Japan and Germany*, WTC Panel Report, WTC Hyper-Librarian, September (1997).
 - [17]. L.E. MURR, A.W. HARE AND N.G. EROR, *Introduction the Metal Matrix High Temperature Superconductor*, Advanced Materials and Process, (1987), 36-44.
 - [18]. A.I. BRAGINSKI AND W. LUDWIG, *ISEC'97*, **1**, (1997), 121.
 - [19]. H.S. KWOK AND D.T. SHAW, *Superconductivity and Its Applications*, Elsevier, New York, Amsterdam, London, London, (1998), 201.
 - [20]. M. CYROT AND D. PAVUNA, *Introduction to Superconductivity and High-Tc Materials*, World Scientific, Singapore, New Jersey, London, Hongkong, (1992), 174.
 - [21]. ENKIR SUKIRMAN, *Pengaruh Distribusi Kekosongan Oksigen pada Superkonduktivitas $YBa_2Cu_3O_{7-x}$* , Tesis Magister, Program Studi Materials Science, Fakultas Pascasarjana UI, (1991).
 - [22]. GRACE TJ. SULUNGBUDI, *Pembuatan Lapisan Tipis Superkonduktor Y-Ba-Cu-O dan Bi-Sr-Ca-Cu-O*, Laporan Riset RUT-V Ilmu Bahan, Kantor Menteri Negara Riset dan Teknologi-Dewan Riset Nasional, Jakarta (2000).
 - [23]. ENKIR SUKIRMAN, WISNU ARIADI, DAN SALMAH, *Majalah BATAN*, **XXXIII**, 1/2, (2000).