

SUPERKONDUKTOR

1. Sejarah Superkonduktor

Superkonduktor pertama kali ditemukan oleh seorang fisikawan Belanda, Heike Kamerlingh Onnes, dari Universitas Leiden pada tahun 1911. Pada tanggal 10 Juli 1908, Onnes berhasil mencairkan helium dengan cara mendinginkan hingga 4 K atau -269°C . Kemudian pada tahun 1911, Onnes mulai mempelajari sifat-sifat listrik dari logam pada suhu yang sangat dingin. Pada waktu itu telah diketahui bahwa hambatan suatu logam akan turun ketika didinginkan dibawah suhu ruang, akan tetapi belum ada yang dapat mengetahui berapa batas bawah hambatan yang dicapai ketika temperatur logam mendekati 0 K atau nol mutlak. Beberapa ilmuwan pada waktu itu seperti William Kelvin memperkirakan bahwa elektron yang mengalir dalam konduktor akan berhenti ketika suhu mencapai nol mutlak. Dilain pihak, ilmuwan yang lain termasuk Onnes memperkirakan bahwa hambatan akan menghilang pada keadaan tersebut. Untuk mengetahui yang sebenarnya terjadi, Onnes kemudian mengalirkan arus pada kawat merkuri yang sangat murni dan kemudian mengukur hambatannya sambil menurunkan suhunya. Pada suhu 4,2 K, Onnes mendapatkan hambatannya tiba-tiba menjadi hilang. Arus mengalir melalui kawat merkuri terus-menerus.

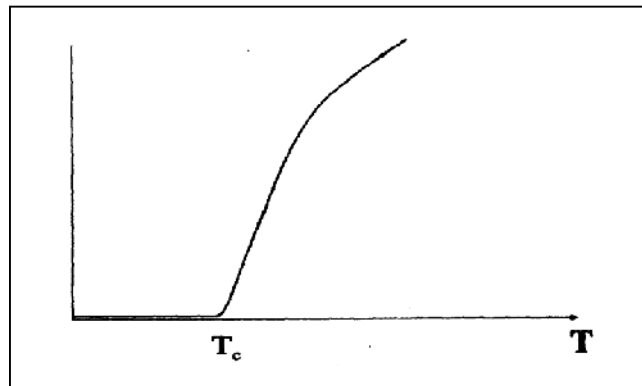
Dengan tidak adanya hambatan, maka arus dapat mengalir tanpa kehilangan energi. Percobaan Onnes dengan mengalirkan arus pada suatu kumparan superkonduktor dalam suatu rangkaian tertutup dan kemudian mencabut sumber arusnya lalu mengukur arusnya satu tahun kemudian ternyata arus masih tetap mengalir. Fenomena ini kemudian oleh Onnes diberi nama superkonduktivitas. Atas penemuannya itu, Onnes dianugerahi Nobel Fisika pada tahun 1913.

2. Teori Superkonduktor

2.1. Pengertian Superkonduktor

Superkonduktor merupakan bahan material yang memiliki hambatan listrik bernilai nol pada suhu yang sangat rendah. Artinya

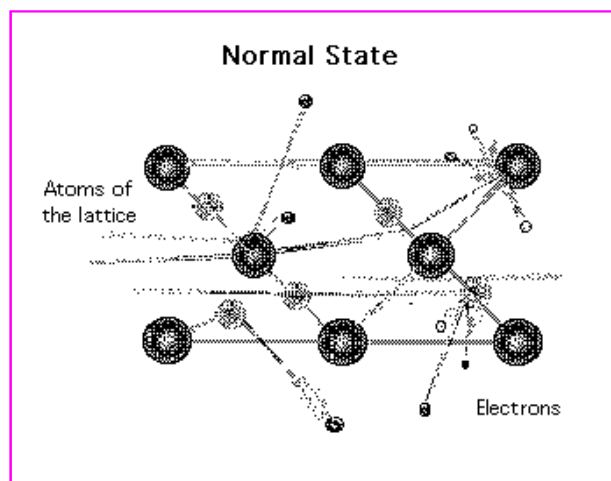
superkonduktor dapat menghantarkan arus walaupun tanpa adanya sumber tegangan. Karakteristik dari bahan Superkonduktor adalah medan magnet dalam superkonduktor bernilai nol dan mengalami efek meissner. Resistivitas suatu bahan bernilai nol jika dibawah suhu kritisnya.



Gambar 1. Grafik hubungan antara resistivitas terhadap Suhu

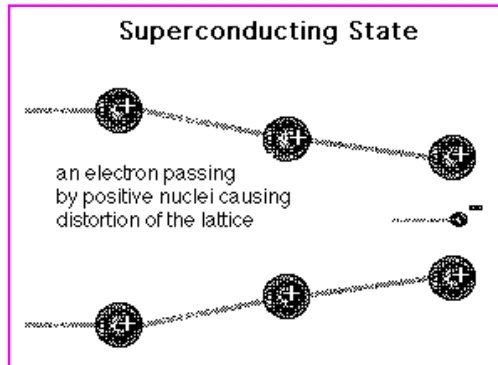
2.2. Sifat Kelistrikan Superkonduktor

Sebelum menjelaskan prinsip superkonduktor, akan lebih baik jika terlebih dahulu menjelaskan bagaimana kerja logam konduktor pada umumnya. Bahan logam tersusun dari kisi-kisi dan basis serta elektron bebas. Ketika medan listrik diberikan pada bahan, elektron akan mendapat percepatan. Medan listrik akan menghamburkan elektron ke segala arah dan menumbuk atom-atom pada kisi. Hal ini menyebabkan adanya hambatan listrik pada logam konduktor.



Gambar 2. Keadaan normal Atom Kisi pada logam

Pada bahan superkonduktor terjadi juga interaksi antara elektron dengan inti atom. Namun elektron dapat melewati inti tanpa mengalami hambatan dari atom kisi. Efek ini dapat dijelaskan oleh Teori BCS. Ketika elektron melewati kisi, inti yang bermuatan positif menarik elektron yang bermuatan negatif dan mengakibatkan elektron bergetar.



Gambar 3. Keadaan Superkonduktor Atom Kisi pada logam

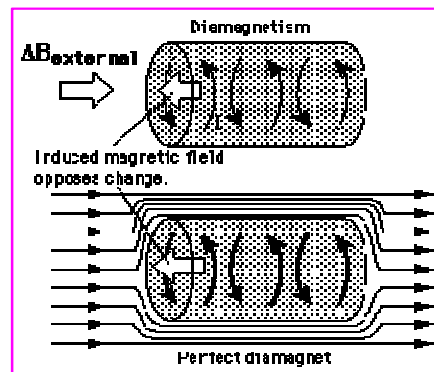
Jika ada dua buah elektron yang melewati kisi, elektron kedua akan mendekati elektron pertama karena gaya tarik dari inti atom-atom kisi lebih besar. Gaya ini melebihi gaya tolak-menolak antar elektron sehingga kedua elektron bergerak berpasangan.

Pasangan ini disebut *Cooper Pairs*. Efek ini dapat dijelaskan dengan istilah *Phonons*. Ketika elektron pertama pada *Cooper Pairs* melewati inti atom kisi. Elektron yang mendekati inti atom kisi akan bergetar dan memancarkan *Phonon*. Sedangkan elektron lainnya menyerap *Phonon*. Pertukaran *Phonon* ini mengakibatkan gaya tarik menarik antar elektron. Pasangan elektron ini akan melalu kisi tanpa gangguan dengan kata lain tanpa hambatan.

2.3. Sifat Kemagnetan Superkonduktor

Sifat lain dari superkonduktor yaitu bersifat diamagnetisme sempurna. Jika sebuah superkonduktor ditempatkan pada medan magnet, maka tidak akan ada medan magnet dalam superkonduktor. Hal ini terjadi karena superkonduktor menghasilkan medan magnet dalam bahan yang berlawanan arah dengan medan magnet luar yang diberikan. Efek

yang sama dapat diamati jika medan magnet diberikan pada bahan dalam suhu normal kemudian didinginkan sampai menjadi superkonduktor. Pada suhu kritis, medan magnet akan ditolak. Efek ini dinamakan Efek Meissner.



Gambar 4. Diamagnetik Sempurna

2.4. Sifat Quantum Superkonduktor

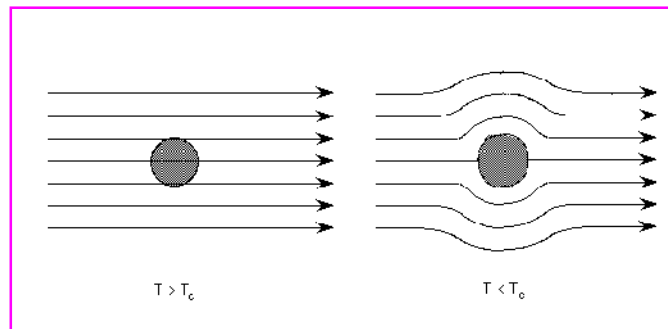
Teori dasar Quantum untuk superkonduktor dirumuskan melalui tulisan Bardeen, Cooper dan Schrieffer pada tahun 1957. Teori dinamakan teori BCS. Fungsi gelombang BCS menyusun pasangan partikel dan . Ini adalah bentuk lain dari pasangan partikel yang mungkin dengan Teori BCS. Teori BCS menjelaskan bahwa :

- a. Interaksi tarik menarik antara elektron dapat menyebabkan keadaan dasar terpisah dengan keadaan tereksitasi oleh energi gap.
- b. Interaksi antara elektron, elektron dan kisi menyebabkan adanya energi gap yang diamati. Mekanisme interaksi yang tidak langsung ini terjadi ketika satu elektron berinteraksi dengan kisi dan merusaknya. Elektron kedua memanfaatkan keuntungan dari deformasi kisi. Kedua elektron ini berinteraksi melalui deformasi kisi.
- c. *London Penetration Depth* merupakan konsekuensi dari Teori BCS.
- d. Teori BCS memprediksi suhu kritis untuk , yaitu sebesar :

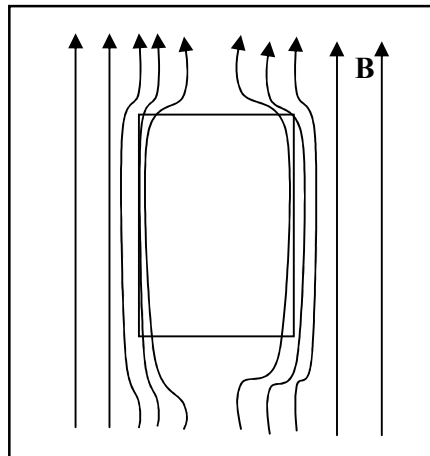
2.5. Efek Meissner

Ketika superkonduktor ditempatkan di medan magnet luar yang lemah, medan magnet akan menembus superkonduktor pada jarak yang sangat kecil dan dinamakan *London Penetration Depth*. Pada bahan superkonduktor umumnya *London Penetration Depth* sekitar 100 nm. Setelah itu medan magnet bernilai nol. Peristiwa ini dinamakan Efek Meissner dan merupakan karakteristik dari superkonduktor. Efek Meissner adalah efek dimana superkonduktor menghasilkan medan magnet.

Efek Meissner ini sangat kuat sehingga sebuah magnet dapat melayang karena ditolak oleh superkonduktor. Medan magnet ini juga tidak boleh terlalu besar. Apabila medan magnetnya terlalu besar, maka efek Meissner ini akan hilang dan material akan kehilangan sifat superkonduktivitasnya.



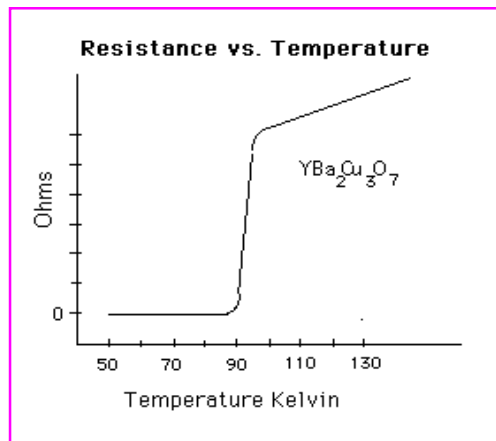
Gambar 5. Efek Meissner



Gambar 6. London Penetration Depth

2.6. Suhu dan Medan Magnet Kritis

Suhu kritis adalah suhu yang membatasi antara sifat konduktor dan superkonduktor. Jika suhu suatu bahan dinaikan, maka getaran electron akan bertambah sehingga banyak *Phonons* yang dipancarkan. Ketika mencapai suhu kritis tertentu, maka *Phonons* akan memecahkan *Cooper Pairs* dan bahan kembali ke keadaan normal. Contoh grafik Hambatan terhadap suhu pada bahan $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ sebagai berikut,



Gambar 7. Grafik Hambatan terhadap Suhu

Medan magnet kritis adalah batas kuatnya medan magnet sehingga bahan superkonduktor memiliki medan magnet. Jika medan magnet yang diberikan pada bahan superkonduktor, maka bahan superkonduktor tak akan mengalami efek meissner lagi.

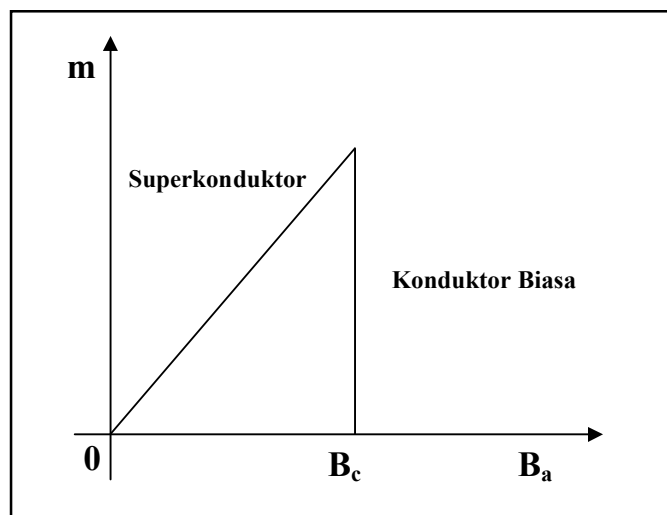
2.7. Tipe – tipe Superkonduktor

Berdasarkan interaksi dengan medan magnetnya, maka superkonduktor dapat dibagi menjadi dua tipe yaitu Superkonduktor Tipe I dan Superkonduktor Tipe II.

2.7.1. Superkonduktor Tipe I

Superkonduktor tipe I menurut teori BCS (Bardeen, Cooper, dan Schrieffer) dijelaskan dengan menggunakan pasangan elektron (yang sering disebut pasangan Cooper). Pasangan elektron bergerak sepanjang terowongan penarik yang dibentuk ion-ion logam yang bermuatan positif.

Akibat dari adanya pembentukan pasangan dan tarikan ini arus listrik akan bergerak dengan merata dan superkonduktivitas akan terjadi. Superkonduktor yang berkelakuan seperti ini disebut superkonduktor jenis pertama yang secara fisik ditandai dengan efek Meissner, yakni gejala penolakan medan magnet luar (asalkan kuat medannya tidak terlalu tinggi) oleh superkonduktor. Bila kuat medannya melebihi batas kritis, gejala superkonduktivitasnya akan menghilang. Maka pada superkonduktor tipe I akan terus – menerus menolak medan magnet yang diberikan hingga mencapai medan magnet kritis. Kemudian dengan tiba-tiba bahan akan berubah kembali ke keadaan normal.



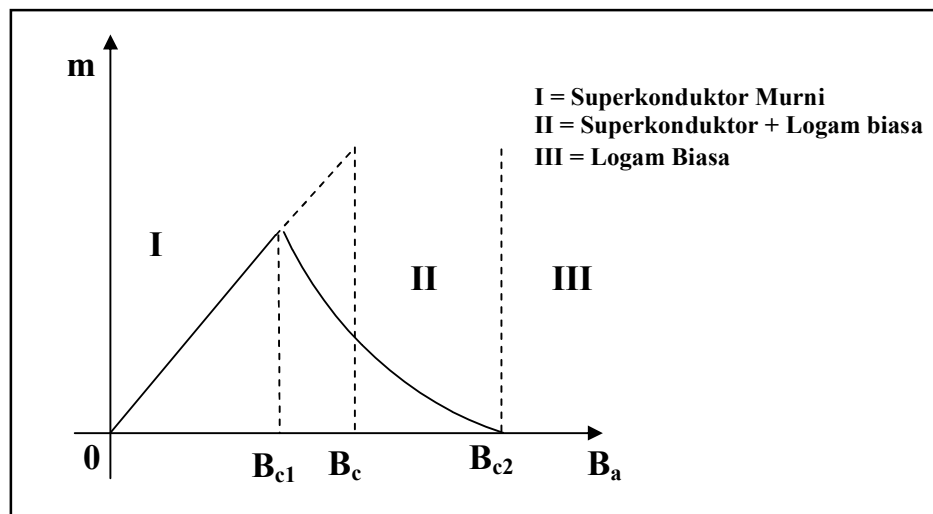
Gambar 8. Grafik Magnetisasi terhadap Medan magnet

2.7.2. Superkonduktor Tipe II

Superkonduktor tipe II ini tidak dapat dijelaskan dengan teori BCS karena apabila superkonduktor jenis II ini dijelaskan dengan teori BCS, efek Meissner nya tidak terjadi. Abrisokov berhasil memformulasikan teori baru untuk menjelaskan superkonduktor jenis II ini. Ia mendasarkan teorinya pada kerapatan pasangan elektron yang dinyatakan dalam parameter keteraturan fungsi gelombang. Abrisokov dapat menunjukkan bahwa parameter tersebut dapat mendeskripsikan pusaran (vortices) dan

bagaimana medan magnet dapat menembusi bahan sepanjang terowongan dalam pusaran-pusaran ini. Lebih lanjut ia pun dengan secara mendetail dapat memprediksikan jumlah pusaran yang tumbuh seiring meningkatnya medan magnet. Teori ini merupakan terobosan dan masih digunakan dalam pengembangan dan analisis superkonduktor dan magnet.

Superkonduktor tipe II akan menolak medan magnet yang diberikan. Namun perubahan sifat kemagnetan tidak tiba-tiba tetapi secara bertahap. Pada suhu kritis, maka bahan akan kembali ke keadaan semula. Superkonduktor Tipe II memiliki suhu kritis yang lebih tinggi dari superkonduktor tipe I.



Gambar 9. Grafik Magnetisasi terhadap Medan magnet

2.8. Kelompok Superkonduktor

Berdasarkan nilai suhu kritisnya, superkonduktor dibagi menjadi dua kelompok yaitu :

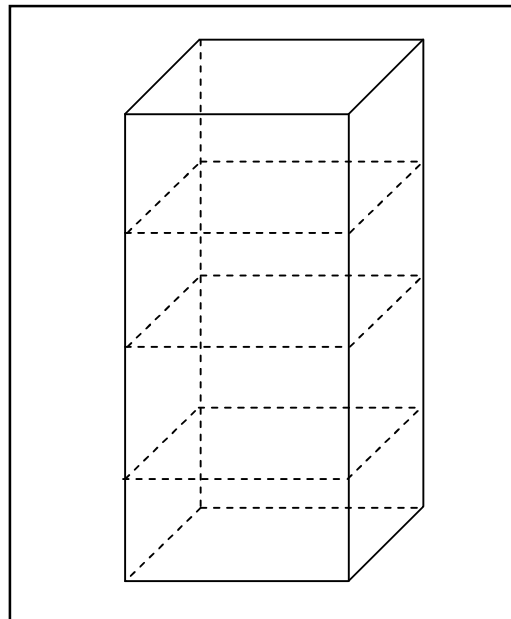
2.8.1. Superkonduktor bersuhu kritis rendah

Superkonduktor jenis ini memiliki suhu kritis lebih kecil dari 23 K. Superkonduktor jenis ini sudah ditinggalkan karena biaya yang mahal untuk mendinginkan bahan.

2.8.2. Superkonduktor bersuhu kritis tinggi

Superkonduktor jenis ini memiliki suhu kritis lebih besar dari 78 K. Superkonduktor jenis ini merupakan bahan yang sedang dikembangkan sehingga diharapkan memperoleh superkonduktor pada suhu kamar sehingga lebih ekonomis.

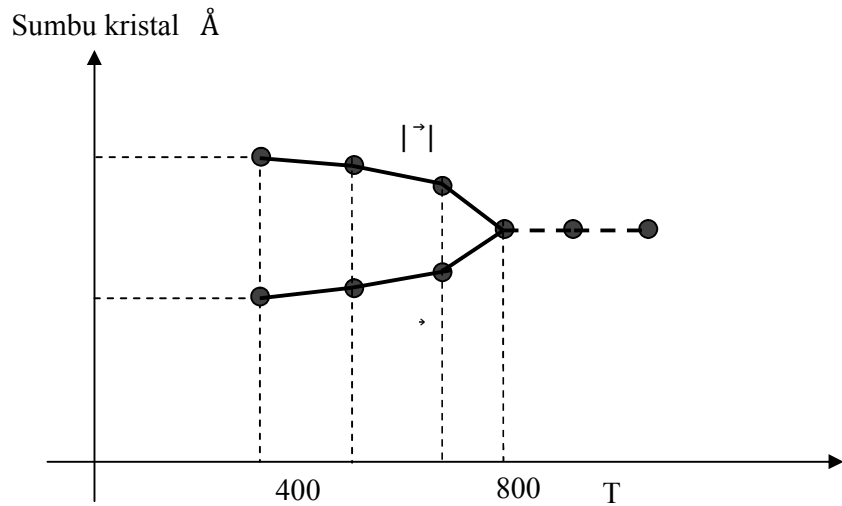
Contoh Superkonduktor bersuhu kritis tinggi adalah sampel bahan $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Bahan ini memiliki struktur kristal orthorombic ($a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$)



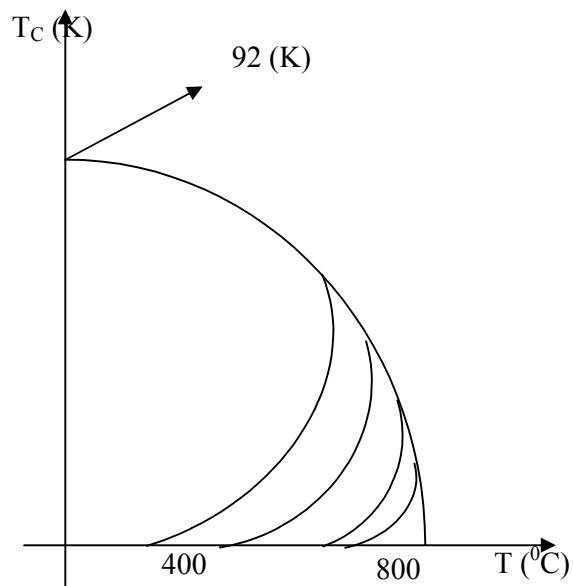
Gambar 10. Struktur Ortorombik

2.9. Suhu Pemadaman

Suhu pemadaman merupakan batas suhu untuk merusak sifat superkonduktor. Artinya pada suhu ini superkonduktor akan rusak



Pada grafik diatas dapat kita lihat bahwasanya makin tinggi suhu yang diberikan pada bahan superkonduktor, maka struktur kristal superkonduktor tidak lagi berbentuk ortorombik. Maka dengan adanya perubahan struktur kristal superkonduktor, suatu bahan akan kehilangan sifat superkonduktornya.



Grafik diatas menunjukkan hubungan antara suhu kritis dengan suhu bahan superkonduktor. Jika suhu yang diberikan pada bahan

superkonduktor makin besar, maka suhu kritis bahan akan mendekati nilai nol kelvin.

2.10. Sintesis Superkonduktor

a. Sampel $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

Bahan-bahan yang diperlukan untuk membuat sampel $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ adalah Y_2O_3 , BaCO_3 , CuO . Langkah-langkah sintesis Sampel $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ diantaranya :

1. Persiapan bahan dengan komposisi awal dengan menggunakan perbandingan molar off-stokiometri.
2. Pencampuran dan penggerusan pertama di dalam mortar agate. Kalsinasi pada suhu 940^0 C selama 24 jam.
3. Pendinginan pada suhu kamar.
4. Sintering pada suhu 940^0 C .
5. Pendinginan dalam tungku.

b. Sampel BPSCCO-2223

Bahan-bahan yang diperlukan untuk melakukan sintesis bahan Sampel BPSCCO-2223 adalah Bi_2O_3 , PbO , SrCO_3 , CuO , CaCO_3 . Langkah-langkah sintesis Superkonduktor Sampel BPSCCO-2223 terdiri dari :

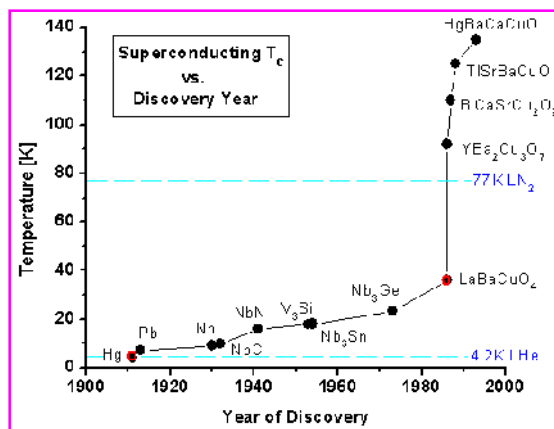
1. Persiapan bahan dengan komposisi awal dengan menggunakan perbandingan molar off-stokiometri.
2. Pencampuran dan penggerusan pertama di dalam mortar agate. Kalsinasi pada suhu 810^0 C selama 20 jam.
3. Penggerusan kedua.
4. Sintering pada suhu 830^0 C .
5. Pendinginan dalam tungku.

Selama proses pembentukan sampel tersebut, sampel akan diujikan dengan yang diarahkan untuk mengendalikan pewaktuan dari proses sintering dengan suhu pilihan adalah 830^0 C . Setelah proses sintering selesai dalam waktu yang berkesesuaian (30 jam, 60 jam, 90 jam), maka akan diadakan beberapa pengujian karakteristik sampel, yaitu:

1. Uji Efek Meissner
2. Uji X-ray Diffraction
3. Pengukuran Suhu Kritis (T_c)
4. Pengukuran Fraksi Volume (FV)

3. Perkembangan Superkonduktor

Perkembangan peningkatan suhu kritis T_c pada superkonduktor ditunjukkan dalam grafik dibawah ini.



Gambar 11. Grafik Suhu Kritis terhadap tahun penemuan

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan dalam suhu kritis superkonduktor. Pada awalnya suhu kritis superkonduktor itu sangat rendah yaitu kurang dari 4,2 K untuk logam raksa, tetapi pada perkembangan selanjutnya suhu kritis dari superkonduktor itu meningkat secara perlahan-lahan hingga mencapai suhu kritis tertinggi pada suhu 138 K untuk HgBaCaCuO.

Penemuan yang berkaitan dengan superkonduktor terjadi pada tahun 1933. Walter Meissner dan Robert Ochsenfeld menemukan bahwa suatu superkonduktor akan menolak medan magnet. Sebagaimana diketahui, apabila suatu konduktor digerakkan dalam medan magnet, suatu arus induksi akan mengalir dalam konduktor tersebut. Akan tetapi, dalam superkonduktor arus yang dihasilkan tepat berlawanan dengan medan tersebut sehingga medan

tersebut tidak dapat menembus material superkonduktor tersebut. Hal ini akan menyebabkan magnet tersebut ditolak. Fenomena ini dikenal dengan istilah Diamagnetisme dan efek ini kemudian dinamakan Efek Meissner.

Selanjutnya ditemukan juga superkonduktor-superkonduktor lainnya. Selain merkuri, ternyata beberapa unsur-unsur lainnya juga menunjukkan sifat superkonduktor dengan harga T_c yang berbeda. Sebagai contoh, karbon bersifat superkonduktor dengan T_c 15 K. Hal yang ironis adalah logam emas, tembaga dan perak yang merupakan logam konduktor terbaik bukanlah superkonduktor.

Pada tahun 1986 Alex Müller and Georg Bednorz, peneliti di Laboratorium Riset IBM di Rüşchlikon, Switzerland berhasil membuat suatu keramik yang terdiri dari unsur Lanthanum, Barium, Tembaga, dan Oksigen yang bersifat superkonduktor pada suhu tertinggi pada waktu itu, 30 K. Penemuan ini menjadi spektakuler karena keramik selama ini dikenal sebagai isolator. Keramik tidak menghantarkan listrik sama sekali pada suhu ruang. Penemuan ini membuat keduanya diberi penghargaan hadiah Nobel setahun kemudian.

Pada bulan Februari 1987, ditemukan suatu keramik yang bersifat superkonduktor pada suhu 90 K. Penemuan ini menjadi penting karena dengan demikian dapat digunakan nitrogen cair sebagai pendinginnya. Karena suhunya cukup tinggi dibandingkan dengan material superkonduktor yang lain, maka material-material tersebut diberi nama superkonduktor suhu tinggi. Suhu tertinggi suatu bahan menjadi superkonduktor saat ini adalah 138 K, yaitu untuk suatu bahan yang memiliki rumus $Hg_{0.8}Tl_{10.2}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8.33}$.

Bahan	T_c (K)	Ditemukan
Raksa Hg (α)	4,2	1911
Timbal Pb	7,2	1913
Niobium nitrida	16,0	1960-an
Niobium-3-timah	18,1	1960-an

$Al_{0,8}Ge_{0,2}Nb_3$	20,7	1960-an
Niobium germanium	23,2	1973
Lanthanum barium tembaga oksida	28	1985
Yttrium barium tembaga oksida (1-2-3 atau YBCO)	93	1987
Thalium barium kalsium tembaga oksida	125	1987

4. Aplikasi Superkonduktor

Aplikasi Superkonduktor dalam kehidupan diantaranya :

a. Kabel Listrik.

Dengan menggunakan bahan superkonduktor, maka energi listrik tidak akan mengalami disipasi karena hambatan pada bahan superkonduktor bernilai nol. Maka penggunaan energi listrik akan semakin hemat.

b. Alat Transportasi

Penggunaan superkonduktor dalam bidang transportasi adalah Kereta Listrik super cepat yang dikenal dengan sebutan Magnetik Levitation (MAGLEV).