

## KB 2. Teknologi Kereta Api Yang Berkecepatan Tinggi

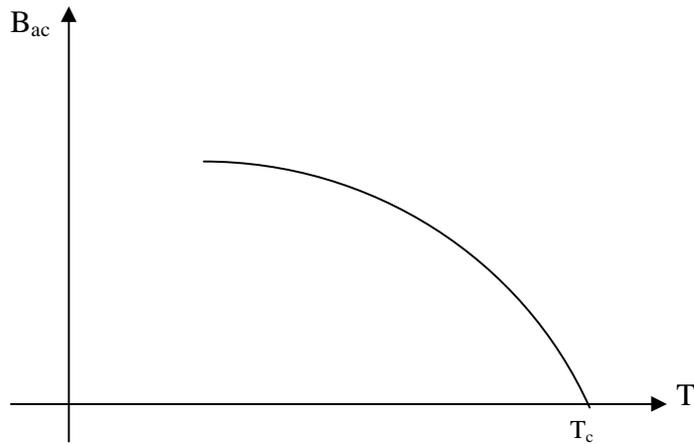
Aplikasi superkonduktor dalam teknologi kereta Api supercepat adalah memanfaatkan salah satu sifat dari superkonduktor yang paling menarik, yaitu sifat efek Meissner. Namun aplikasi ini secara komersial belum tersedia. Seperti dijelaskan di atas bahwa sebuah logam superkonduktor dapat membangkitkan medan magnet sedemikian rupa sehingga dapat menolak medan magnet luar. Atau dengan kata lain, susceptibilitas magnetik superkonduktor adalah negatif. Artinya, superkonduktor adalah logam diamagnetik. Dengan adanya sifat ini, maka para ahli berusaha memanfaatkannya dalam teknologi kereta api yang berkecepatan tinggi. Kecepatan tinggi dapat dicapai dengan cara membuat seluruh rangkaian gerbong kereta api itu dibuat melayang di atas rel. Hal ini dimungkinkan dengan cara menempatkan medan elektromagnetik pada rel kereta api dan melekatkan logam superkonduktor pada gerbong-gerbong kereta api sehingga akibat adanya efek Meissner itu maka rangkaian gerbong kereta api dapat melayang. Dengan demikian, gesekan antara rel dengan rangkaian gerbong menjadi praktis nol. Hasilnya, dengan memberi sedikit saja gaya dorong pada rangkaian gerbong tersebut, maka rangkaian gerbong tersebut dapat melaju dengan kecepatan yang sangat tinggi.

Keadaan seperti di atas tidak berarti tanpa kendala. Sebab medan magnet luar yang sangat kuat dapat merusak sifat superkonduktivitas logam superkonduktor. Jadi, setiap logam superkonduktor akan memiliki batas kekuatan untuk menolak medan magnet luar. Jika batas ini sudah dilampaui, maka sifat superkonduktor itu akan berubah menjadi konduktor biasa, meskipun secara fisik logam itu tidak mengalami perubahan. Nilai terkecil medan magnet luar yang menyebabkan sifat superkonduktivitas logam rusak disebut medan magnet kritis dan biasa diberi simbol  $B_{ac}(T)$ .  $B_{ac}(T)$  ini merupakan fungsi suhu  $T$ . Artinya, nilai minimum medan

magnet luar ini bervariasi terhadap suhu. **Sebagai contoh**, pada saat suhu logam superkonduktor itu tepat sama dengan suhu kritisnya ( $T_c$ ) maka nilai  $B_{ac}$  ini adalah nol. Sebab pada suhu kritis  $T_c$  superkonduktivitas baru mulai timbul, sehingga tidak perlu ada medan magnet luar untuk merusak sifat superkonduktivitas tersebut, karena dengan sedikit kenaikan suhu saja sifat superkonduktivitas itu akan hilang. Artinya, sifat superkonduktivitas logam pada saat suhu logam tepat sama dengan suhu kritisnya adalah paling lemah. Agar sifat superkonduktivitas ini menjadi sangat kuat, kita harus mendinginkan logam superkonduktor itu sampai suhunya jauh di bawah suhu kritis ( $T_c$ ). Dengan demikian, nilai medan magnet luar yang diperlukan untuk merusak sifat superkonduktivitas adalah sangat besar. **Sebagai contoh**, jika sebuah logam superkonduktor memiliki suhu kritis 92 K kemudian didinginkan sampai misalnya 78 K (78 K adalah titik didih nitrogen cair), maka ia dapat menolak medan magnet luar yang cukup besar. Sehingga untuk merusaknya akan diperlukan medan magnet luar yang lebih besar. Grafik fungsi  $B_{ac}(T)$  dapat Anda lihat pada Gambar 7. Kurva  $B_{ac}$  sebagai fungsi  $T$  memisahkan fase superkonduktor dan fase konduktor biasa. Sisi kiri bawah dari kurva itu merupakan fase superkonduktor, sedangkan sisi kanan atas dari kurva itu adalah fase logam konduktor biasa.

Efek Meissner menunjukkan bahwa medan magnet di dalam sebuah logam superkonduktor seolah-olah sama dengan nol. Oleh karena itu, kita dapat menuliskan persamaan untuk medan magnet dalam logam superkonduktor sbb:

$$B = B_a + 4 \pi M = 0 \quad (\text{dalam sistem satuan CGS}) \quad \text{atau} \quad (2)$$



Gambar 7. Kurva medan magnet kritis ( $B_{ac}$ ) sebagai fungsi suhu ( $T$ ). Tepat pada saat  $T = T_c$  nilai  $H_c = 0$ .

$$B = B_a + \mu_0 M = 0 \quad (\text{dalam sistem satuan SI}). \quad (3)$$

dimana  $B$  = medan magnet di dalam logam superkonduktor,  $B_a$  = medan magnet dari luar, dan  $M$  = magnetisasi. Dari kedua persamaan di atas, kita dapat mengetahui bahwa medan magnet dari luar ( $B_a$ ) adalah sama dengan:

$$B_a = -4 \pi M \quad (\text{dalam sistem satuan CGS})$$

atau (4)

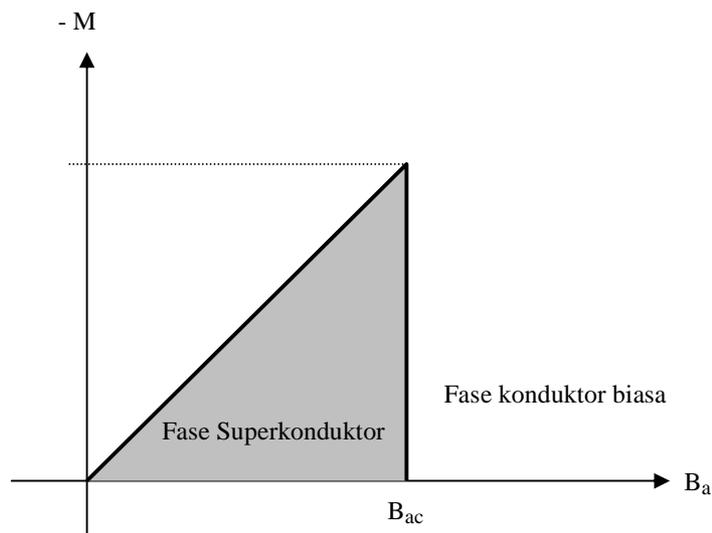
$$B_a = -\mu_0 M = -M/\epsilon_0 c^2, \quad (\text{dalam sistem satuan SI}).$$

dimana  $\mu_0$  = permeabilitas ruang hampa =  $4\pi \times 10^{-7}$  Wb/A.m, dan  $\epsilon_0$  = permitivitas ruang hampa =  $8,854 \times 10^{-12}$  F/m.

Berdasarkan sifat magnetisasi bahan superkonduktor, kita dapat membedakan dua jenis superkonduktor, yaitu superkonduktor tipe I dan tipe II.

### 9.1 Superkonduktor tipe I

Superkonduktor tipe I yang asalnya sering juga disebut sebagai superkonduktor lunak memiliki karakteristik efek Meissner secara utuh. Artinya, pada saat suhu superkonduktor itu lebih kecil dari pada suhu kritisnya, maka superkonduktor dapat menolak semua medan magnet luar. Tetapi jika medan magnet itu diperbesar sampai tepat sama dengan medan magnet kritisnya ( $B_{ac}$ ), maka sifat superkonduktivitasnya langsung rusak total. Sehingga magnetisasi ( $M$ ) dari superkonduktor itu langsung jatuh ke nol. Grafig  $M$  sebagai fungsi kuat medan magnet luar ( $B_a$ ) dapat Anda lihat pada Gambar 8 di bawah.



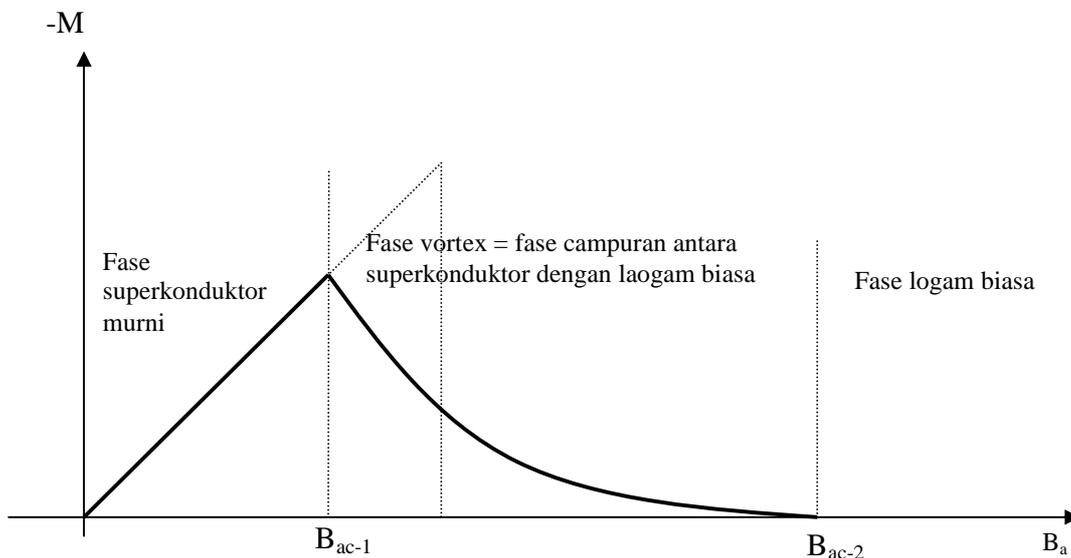
Gambar 8. Magnetisasi ( $M$ ) sebagai fungsi kuat medan magnet luar ( $B_a$ ) untuk superkonduktor tipe I. Keadaan (fase) di sebelah kiri  $B_{ac}$  adalah fase superkonduktor dan fase di sebelah kanan  $B_{ac}$  adalah fase konduktor biasa.

Perhatikan bahwa pada Gambar 8 diatas, sumbu vertikal menyakan sumbu magnetisasi ( $-M$ ). Artinya, meskipun arahnya ke atas, tetapi nilai  $M$  ini adalah negatif. Hal ini berarti pula bahwa sifat kemagnetdan dari bahan superkonduktor itu tetap diamagnetik sempurna.

Nilai  $B_{ac}$  untuk superkonduktor tipe I ini adalah sangat kecil, yaitu sekitar 0,1 tesla. Karena kecilnya nilai  $B_{ac}$  ini dan transisi yang drastis, aplikasi dari superkonduktor tipe I ini sangat terbatas.

## 9.2 Superkonduktor tipe II.

Superkonduktor tipe II ini berbeda dengan tipe I tidak hanya dalam hal kurva magnetisasi saja tetapi juga dalam hal nilai medan magnet kritis ( $B_{ac}$ ). Superkonduktor tipe II ini memiliki  $B_{ac}$  yang sangat tinggi, sehingga superkonduktor ini sering digunakan dalam aplikasi yang melibatkan medan magnet luar yang kuat. **Sebagai contoh** dalam teknologi kereta api cepat. Adanya medan magnet kritis yang tinggi ini disebabkan oleh adanya dua medan magnet kritis, yaitu medan magnet kritis pertama ( $B_{ac-1}$ ) dan medan magnet kritis kedua ( $B_{ac-2}$ ). Kedua medan magnet kritis tersebut dapat Anda lihat pada grafik  $-M$  (diamagnetik) sebagai fungsi  $B_a$  dalam Gambar 9.



Gambar 9. Kurva  $-M$  sebagai fungsi  $B_a$  untuk superkonduktor tipe II. Untuk  $B_a$  antara 0 dan  $B_{ac-1}$  merupakan fase superkonduktor murni, untuk  $B_a$  antara  $B_{ac-1}$  dan  $B_{ac-2}$  merupakan fase vortex, artinya fase campuran antara superkonduktor dengan logam biasa, dan untuk  $B_a > B_{ac-2}$  merupakan fase logam biasa.

Pada saat medan magnet luar diperbesar dari nol sampai  $B_{ac-1}$ , magnetisasi ( $-M$ ) terus membesar. Pada rentang medan magnet ini, bahan masih bersifat sebagai superkonduktor murni dan memiliki efek Meissner yang utuh. Selanjutnya, magnetisasi itu turun terus sampai medan magnet luar sama dengan medan magnet kritis kedua ( $B_{ac-2}$ ). Pada rentang medan magnet antara  $B_{ac-1}$  dan  $B_{ac-2}$  ini bahan itu berada pada keadaan (fase) vortek, yaitu fase dimana superkonduktor bercampur dengan logam biasa. Artinya, sebagian dari medan magnet luar mulai menembus bahan superkonduktor. Bagian bahan yang ditembus oleh medan magnet luar tidak lagi bersifat sebagai superkonduktor, tetapi ia sudah berubah menjadi logam biasa. Di atas  $B_{ac-2}$  magnetisasi bahan sama dengan nol dan berarti bahwa bahan sudah menjadi konduktor biasa.

Di samping suhu dan medan magnet luar, arus listrik pun dapat merusak superkonduktivitas suatu bahan. Sehingga kita mengenal istilah rapat arus listrik kritis ( $J_c$ ). Rapat arus kritis adalah rapat arus listrik terbesar yang dapat mengalir dalam zat superkonduktor tanpa merusak sifat superkonduktivitas bahan tersebut. Apabila rapat arus yang mengalir dalam superkonduktor sama dengan atau lebih besar dari pada rapat arus kritis  $J_c$  maka superkonduktivitas dari bahan itu akan hilang atau rusak. Rapat arus kritis ini pun sangat bergantung pada suhu superkonduktor itu. Makin rendah suhu superkonduktor makin tinggi rapat arus kritis.

### **9.3. Superkonduktor bersuhu kritis tinggi.**

Pada tahun 1986, dua orang peneliti dari IBM di Zurich, yaitu Bednorz dan Muller melaporkan hasil penemuan mereka tentang bahan baru superkonduktor. Bahan itu merupakan campuran antara La-Ba-Cu-O. Bahan tersebut pada saat itu berupa keramik (polikristal) dan memiliki suhu kritis 34 K. Suhu kritis ini termasuk sangat jauh lebih besar dari suhu kritis bahan

superkonduktor yang ditemukan jauh sebelumnya. Oleh karena itu bahan ini dan bahan-bahan yang ditemukan kemudian dengan suhu kritis yang lebih tinggi dari 34 K disebut superkonduktor bersuhu kritis tinggi. Bahan dengan suhu kritis di bawah 34 K disebut superkonduktor bersuhu kritis rendah. Suhu kritis tertinggi untuk bahan superkonduktor yang bersuhu kritis rendah adalah hanya 23 K, yaitu untuk bahan superkonduktor Nb<sub>3</sub>Ge yang ditemukan pada tahun 1977. Bahan ini termasuk superkonduktor tipe II.

Ratio mol lengkap dari bahan superkonduktor bersuhu kritis yang di temukan oleh Bednorz dan Muller adalah La<sub>1,85</sub>Ba<sub>0,15</sub>CuO<sub>4</sub>. Superkonduktor ini pun termasuk superkonduktor tipe II dengan B<sub>ac-2</sub> 43 MA/m. Bahan berikutnya yang ditemukan adalah YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> yang berbentuk keramik dan memiliki struktur kristal ortorombik dengan suhu kritis 92 K serta B<sub>ac-2</sub> sebesar 111 MA/m. Superkonduktor ini ditemukan pada tahun 1987 oleh M. K. Wu, J. R. Ashburn, dan C. J. Torng dari Jurusan Fisika, Universitas Alabama Amerika Serikat. Superkonduktor ini pun termasuk tipe II.

Pada tahun 1988, dua campuran bahan superkonduktor lainnya ditemukan. Kedua bahan itu adalah Bi-cuprate dan Tl-cuprate dengan suhu kritis masing-masing 108 K dan 125 K. Keduanya memiliki struktur kristal ortorombik dan berbentuk keramik serta termasuk superkonduktor tipe II. Nilai B<sub>ac-2</sub> untuk kedua bahan ini belum diketahui.

**Contoh soal :** Sebuah logam superkonduktor ditempatkan di dalam medan magnet luar sebesar 10<sup>7</sup> Wb. Jika sifat superkonduktivitas bahan masih utuh, berapakah besarnya magnetisasi di dalam bahan itu.

Penyelesaian

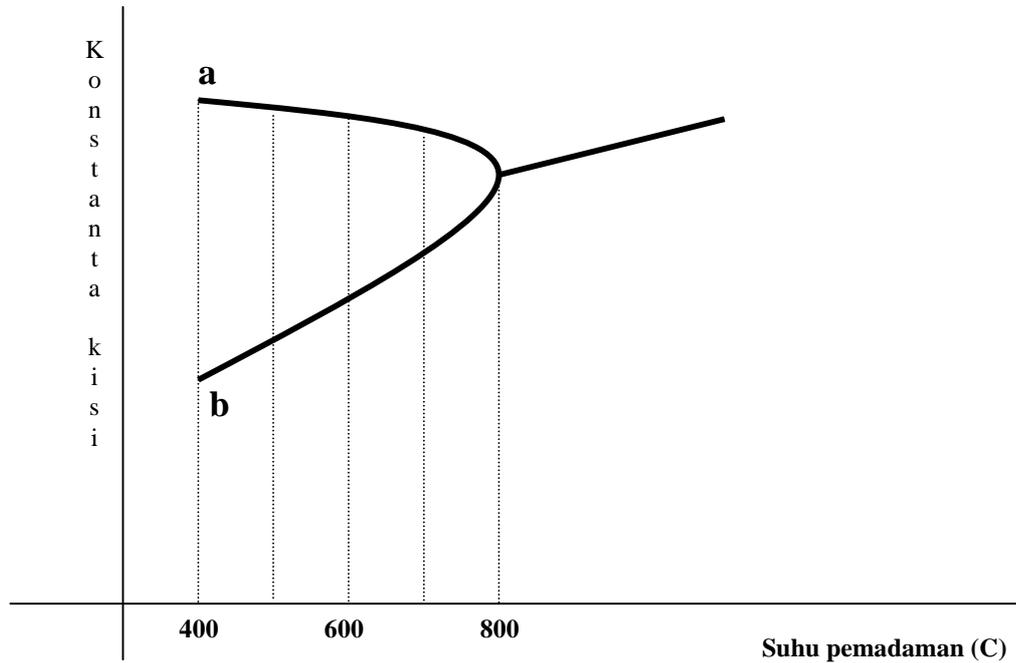
Diketahui B<sub>a</sub> = 10<sup>7</sup> Wb.

Ditanyakan : M

Jawab: dari Persamaan (4) di atas kita mengetahui bahwa  $B_a = -\mu_0 M$ , dimana  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Wb/A.m

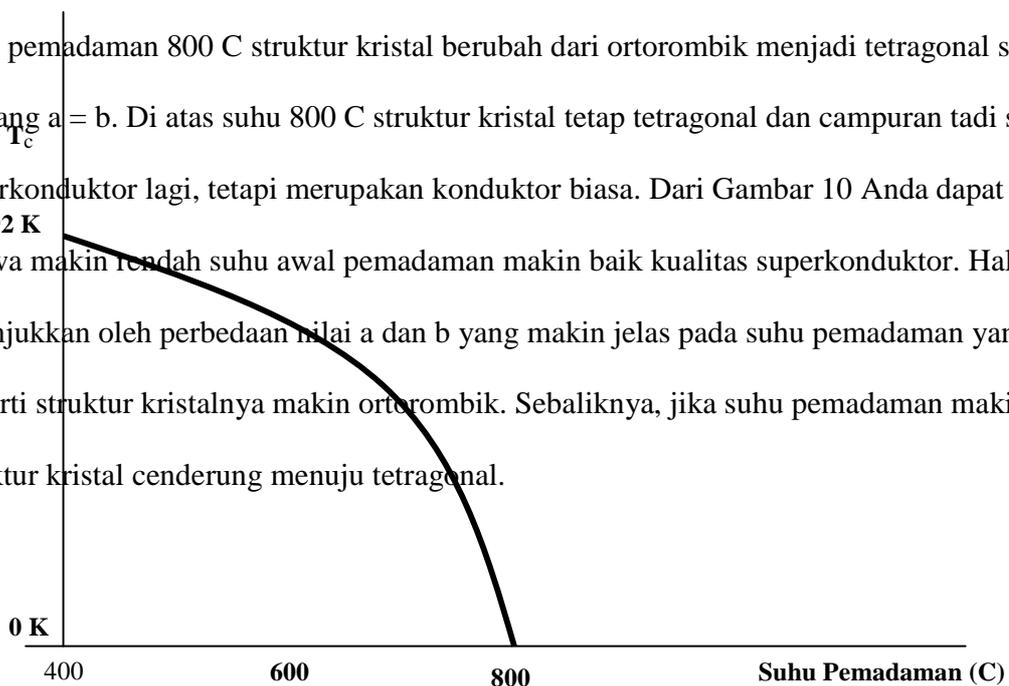
$$\text{Jadi : } M = -B_a/\mu_0 = -10^7/(4\pi \times 10^{-7}) = -\frac{1}{4\pi} \text{ A.m.}$$

Untuk keperluan matakuliah ini, kita hanya akan membahas secara lebih rinci tentang superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , karena di samping kedaannya sangat stabil, artinya dapat diproduksi ulang dengan mudah, juga karakteristik campuran ini sudah diketahui secara rinci. Seperti dijelaskan dalam KB 1 modul ini, yaitu bahwa superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  memiliki struktur kristal ortorombik. Berarti konstanta kisi  $a \neq b \neq c$ , dan  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ . Sedangkan campuran  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,5}$  memiliki struktur kristal tetragonal dan tidak memiliki sifat superkonduktivitas, tetapi hanya sebagai konduktor atau bahkan semikonduktor biasa. Struktur kristal ortorombik bagi superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$  ternyata juga bergantung pada proses pemadaman (pendinginan dari tungku pemanas) sehingga nilai  $a$  dan  $b$  berubah sesuai dengan perubahan suhu awal pemadaman. Akibatnya, suhu kritisnya pun bergantung pada suhu awal pemadaman tersebut. Jadi kualitas superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$  akan sangat bergantung pada suhu awal pemadaman (pendinginan).



Gambar 10. Konstanta kisi a dan b dari struktur kristal ortorombik  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$  sebagai fungsi suhu awal pemadaman.

Ketergantungan konstanta kisi a dan b terhadap suhu pemadaman ditunjukkan dalam Gambar 10. Dari Gambar 10 Anda dapat lihat bahwa pada suhu pemadaman di bawah 800 C struktur kristal masih berbentuk ortorombik, karena nilai a dan b tidak sama. Sedangkan pada suhu pemadaman 800 C struktur kristal berubah dari ortorombik menjadi tetragonal sebab panjang  $a = b$ . Di atas suhu 800 C struktur kristal tetap tetragonal dan campuran tadi sudah bukan superkonduktor lagi, tetapi merupakan konduktor biasa. Dari Gambar 10 Anda dapat memahami bahwa makin rendah suhu awal pemadaman makin baik kualitas superkonduktor. Hal ini ditunjukkan oleh perbedaan nilai a dan b yang makin jelas pada suhu pemadaman yang rendah. Berarti struktur kristalnya makin ortorombik. Sebaliknya, jika suhu pemadaman makin tinggi, struktur kristal cenderung menuju tetragonal.



Gambar 11.  $T_c$  sebagai fungsi suhu awal pepadaman.

Sebagai konsekuensi dari ketergantungan konstanta  $a$  dan  $b$  terhadap suhu awal pepadaman, maka suhu kritis ( $T_c$ ) bahan itu pun bergantung pada suhu pepadaman. Jadi pendinginan bahan superkonduktor dalam proses pembuatan sangat menentukan kualitas superkonduktor yang dihasilkan. Ketergantungan  $T_c$  terhadap suhu pepadaman dapat Anda lihat pada Gambar 11. Dalam Gambar 11 Anda dapat lihat bahwa makin tinggi suhu awal pepadaman makin rendah suhu kritis  $T_c$ . Hal ini berarti bahwa makin tinggi suhu pepadaman makin sulit bahan itu menunjukkan sifat superkonduktivitasnya, sebab harus didinginkan sampai suhu yang sangat rendah (di bawah 92 K).

Di samping mempengaruhi struktur kristal, suhu awal pepadaman juga mempengaruhi kandungan (jumlah oksigen) dalam campuran  $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ . Oleh karena itu, untuk mendapatkan kandungan oksigen yang banyak, maka proses pemanasan biasa diulang dan dilakukan dalam aliran gas oksigen. Proses ini sering disebut proses annealing. Hal ini dimaksudkan untuk memperkecil nilai  $d$  dalam campuran  $YBa_2Cu_3O_{7-d}$  dan bila mungkin untuk mendapatkan  $d = 0$  sehingga campuran yang diperoleh memiliki rumus kimia  $YBa_2Cu_3O_7$  yang merupakan campuran terbaik untuk bahan superkonduktor jenis ini.

### **Latihan.**

Diskusikanlah apa yang akan terjadi dengan sifat superkonduktivitas (menguat atau melemah ?) suatu superkonduktor apabila parameter di bawah ini berubah:

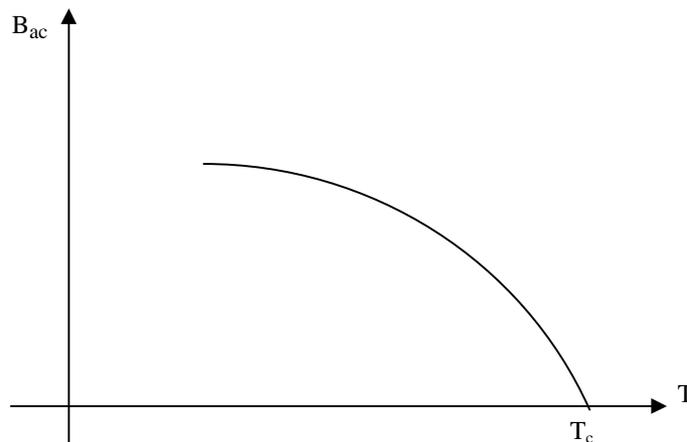
1. Suhu superkonduktor tipe I tetap di bawah  $T_c$  tetapi medan magnetik luar membesar.
2. Suhu superkonduktor naik dan medan magnetik luar nol.
3. Suhu pemadaman rendah dan suhu superkonduktor jauh di bawah  $T_c$ .
4. Superkonduktor berada dalam keadaan (fase) vortex, medan magnet luar diperbesar.
5. Superkonduktor berada dalam keadaan (fase) vortex, suhu superkonduktor dinaikkan diperbesar.

**Pentujunk menjawab latihan.**

1. Untuk nomor 1 gunakan Gambar 7 dan 8.
2. Untuk nomor 2 gunakan Gambar 3.
3. Untuk nomor 3 gunakan Gambar 10.
4. Untuk nomor 4 gunakan Gambar 9.
5. Untuk nomor 5 gunakan Gambar 7 dan Gambar 9.

## Rangkuman

1. Sifat superkonduktor yang bermanfaat bagi pembuatan kereta api supercepat adalah efek Meissner.
2. Sifat superkonduktivitas dapat dirusak oleh medan magnet luar yang lebih besar dari pada medan magnet kritisnya.
3. Medan magnet kritis suatu superkonduktor adalah medan magnet luar terkecil yang dapat merusak sifat superkonduktivitas suatu bahan.
4. Medan magnet kritis superkonduktor adalah bergantung pada suhu superkonduktor itu sendiri. Makin tinggi suhu superkonduktor makin rendah medan magnet kritis.
5. Kurva medan magnet kritis sebagai fungsi suhu ditunjukkan dalam grafik di bawah ini.

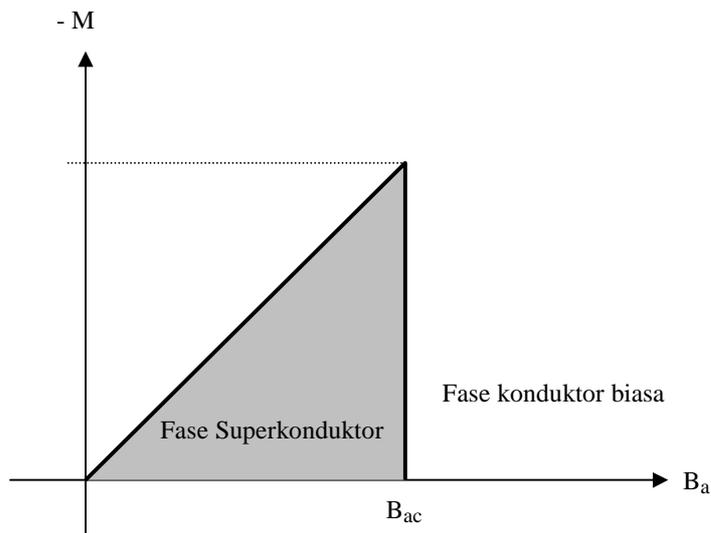


6. Sisi kiri bawah dari kurva itu merupakan fase superkonduktor, sedangkan sisi kanan atas dari kurva itu adalah fase logam konduktor biasa.
7. medan magnet dalam logam superkonduktor dapat ditulis sebagai berikut: B  
 $= B_a + 4 \pi M = 0$  (dalam sistem satuan CGS).

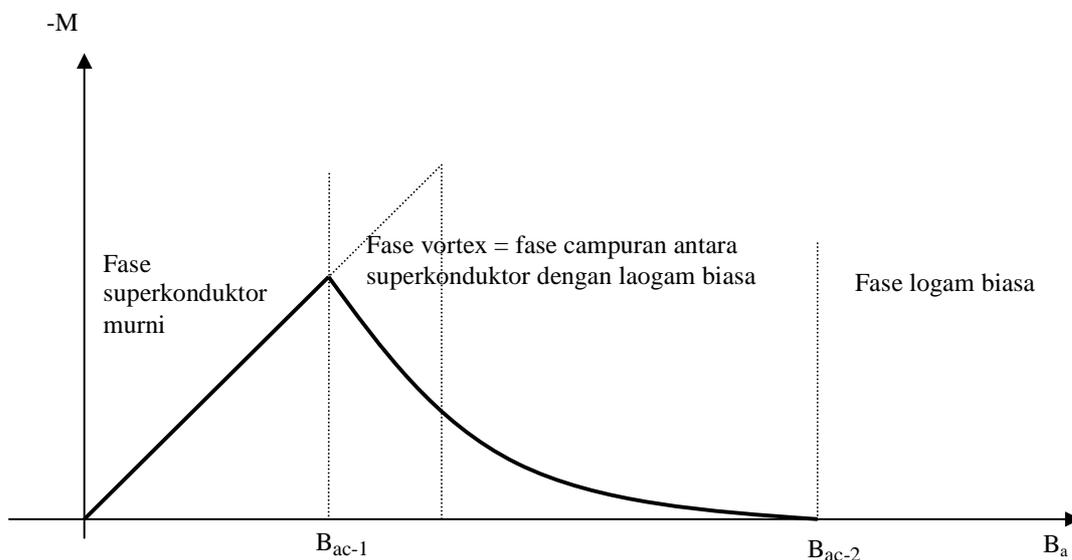
8. Superkonduktor dikelompokkan menjadi 2, yaitu superkonduktor tipe I dan tipe II.

Pengelompokan ini didasarkan atas bentuk magnetisasi kedua tipe tadi.

9. Kurva magnetisasi superkonduktor tipe I adalah sebagai berikut:



10. Magnetisasi superkonduktor tipe II adalah sebagai berikut:



11. Fase vortex adalah fase campuran antara superkonduktor dengan logam biasa, terjadi untuk medan magnet luar ( $B_a$ ) antara  $B_{ac-1}$  dan  $B_{ac-2}$ .

12. Superkonduktor bersuhu kritis tinggi yang pertama ditemukan oleh Bednorz dan Muller adalah campuran  $\text{La}_{1,85}\text{Ba}_{0,15}\text{CuO}_4$  dengan  $B_{ac-2}$  sebesar 43 MA/m. Bahan superkonduktor bersuhu kritis tinggi yang lain adalah:  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , **Bi-cuprate**, dan **Tl-cuprate** dengan suhu kritis masing-masing 92 K, 108 K, dan 125 K.
13. Struktur kristal superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  adalah ortorombik.
14. Konstanta kisi a dan b dari  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  bergantung pada suhu awal pemadaman. Makin tinggi suhu pemadaman nilai a mengecil dan nilai b membesar sampai akhirnya  $a = b$  pada suhu pemadaman sekitar 800 C.
15. Suhu kritis ( $T_c$ )  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  juga bergantung pada suhu pemadaman. Makin tinggi suhu pemadaman makin rendah suhu kritisnya.

## Tes Formatif-2.

Petunjuk: Jawablah semua soal/pertanyaan di bawah ini dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf di depan jawaban yang benar.

---

1. Besaran fisika berikut yang *tidak merusak* sifat superkonduktivitas suatu bahan adalah
  - a. medan magnet luar
  - b. suhu superkonduktor
  - c. medan listrik luar.
  - d. arus listrik.
  
2. Pernyataan berikut yang benar untuk suatu zat superkonduktor adalah:
  - a. makin besar medan magnet luar makin besar rapat arus listrik kritis  $J_c$ .
  - b. makin besar medan magnet luar makin kecil rapat arus listrik kritis  $J_c$ .
  - c.  $J_c$  superkonduktor tidak bergantung pada medan magnet luar.
  - d.  $J_c$  superkonduktor tidak bergantung pada suhu superkonduktor.
  
3. Pernyataan berikut yang benar untuk suatu zat superkonduktor adalah:
  - a. makin besar suhu superkonduktor makin besar medan magnet kritis.
  - b. makin besar suhu superkonduktor makin kecil rapat arus listrik kritis  $J_c$ .
  - c.  $J_c$  superkonduktor tidak bergantung pada suhu superkonduktor.
  - d.  $J_c$  superkonduktor tidak bergantung pada medan magnet luar.
  
4. Pernyataan berikut yang benar untuk suatu zat superkonduktor adalah:
  - a. makin besar suhu superkonduktor makin besar rapat arus listrik kritis  $J_c$ .
  - b. makin besar medan magnet luar makin kecil suhu kritis.
  - c. makin besar medan magnet luar makin besar rapat arus kritis.
  - d.  $J_c$  superkonduktor tidak bergantung pada medan magnet luar.
  
5. Struktur kristal  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  adalah
  - a. ortorombik.

- b. tetragonal.
  - c. heksagonal
  - d. triklinik.
6. Dalam proses pembuatan superkonduktor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , apabila suhu pemadaman makin tinggi, maka
- a. konstanta kisi a membesar, dan konstanta kisi b mengecil.
  - b. konstanta kisi a membesar, dan konstanta kisi b membesar.
  - c. konstanta kisi a mengecil, dan konstanta kisi b mengecil.
  - d. konstanta kisi a mengecil, dan konstanta kisi b membesar.
7. Superkonduktor tipe I memiliki medan magnet kritis sebanyak
- a. 1 buah.
  - b. 2 buah.
  - c. 3 buah.
  - d. tidak memiliki medan magnet kritis.
8. Superkonduktor tipe II memiliki medan magnet kritis sebanyak
- a. 1 buah.
  - b. 2 buah.
  - c. 3 buah.
  - d. tidak memiliki medan magnet kritis.
9. Pernyataan berikut yang *tidak benar* tentang keadaan (fase) vorteks adalah.
- a. terletak antara  $B_{ac-1}$  dan  $B_{ac-2}$ .
  - b. fase campuran antara logam biasa dengan superkonduktor.
  - c. sebagian medan magnet luar dapat menembus superkonduktor.
  - d. terjadi pada superkonduktor tipe I.
10. Medan magnet kritis suatu superkonduktor adalah
- a. medan magnet luar terkecil yang dapat merusak sifat superkonduktivitas suatu bahan.

- b. medan magnet luar terbesar yang dapat merusak sifat superkonduktivitas suatu bahan
- c. medan magnet terkecil di dalam superkonduktor yang dapat merusak sifat superkonduktivitas suatu bahan
- d. medan magnet terbesar di dalam superkonduktor yang dapat merusak sifat superkonduktivitas suatu bahan

**Kunci Jawaban Tes Formatif-1.**

1. B.

2. C.

3. A.

4. A.

5. B.

6. D.

7. D.

8. D.

9. A.

10. C.

**Kunci Jawaban Tes Formatif – 2.**

1. C
2. B
3. B
4. B
5. A
6. D
7. A
8. B
9. D
10. A

## Daftar Pustaka

1. J. G. Bednorz dan K. A. Muller, Z. Physics, B 64, hal 189, 1986.
2. M. K. Wu, dkk., Physics Review Letter, 58, hal 908, 1987.
3. Kardiawarman, dkk, Non Ohmic Behavior of Superconductor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ , Solid State Physics Journal, United Kingdom, 1989.
4. Charle Kittel, Introduction to Solid State Physics, sixth ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1986.
5. R. K. Puri dan V. K. Babbar, Solid State Physics, S. Chand & Company Ltd., Ram Nagar, New Delhi, 1997.
6. M. A. Omar, Elementary Solid State Physics, Addison-Wesley Publ. Company, London, 1975.
7. Ashcroft/Mermin, Solid State Physics, Saunders College, Philadelphia, 1976.