

KARAKTERISTIK MEDAN MAGNET INDUKSI PADA RANGKAIAN SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER SKALA LABORATORIUM

Wisnu Ari Adi, E. Sukirman, Didin S. W., Yustinus P. M., dan Riswal H. Siregar

Puslitbang Iptek Bahan (P3IB) – BATAN
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang 13514

ABSTRAK

KARAKTERISTIK FLUKS MEDAN MAGNET INDUKSI PADA RANGKAIAN SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER SKALA LABORATORIUM. Pembuatan model rangkaian superconducting *fault current limiter* skala laboratorium (SFCL) telah dilakukan. SFCL ini merupakan pembatas arus gagal yang berfungsi sebagai pengaman jaringan listrik. Rangkaian SFCL ini adalah sebuah transformator yang tersusun dari lilitan primer berupa gulungan kawat tembaga (Cu) dan lilitan sekunder berupa *ring* superkonduktor suhu tinggi $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (STT). *Ring* STT ini memiliki suhu transisi kritis $T_c = 92$ K dan arus kritis $I_c = 3,61$ A. Pengujian rangkaian SFCL ini didukung oleh simulasi yang menggunakan *software* ANSYS versi 5.4. Impedansi pada rangkaian SFCL terdiri dari impedansi beban dan trafo. Hasil pengujian SFCL menunjukkan bahwa pada kondisi sebelum gagal (*fault*), fluks medan magnet induksi yang dibangkitkan oleh kumparan primer dapat dihilangkan oleh fluks medan magnet induksi dari *ring* superkonduktor sehingga impedansi pada trafo menjadi nol. Pada kondisi setelah gagal (*fault*), sifat superkonduktivitas dari *ring* hilang akibat medan magnet induksi yang dibangkitkan oleh kumparan primer sehingga impedansi pada trafo menjadi sangat besar. Dapat ditarik kesimpulan bahwa rangkaian SFCL ini akan berjalan normal apabila resultan dari medan magnet induksi pada inti besi (trafo) sama dengan nol.

Kata kunci : Medan magnet induksi, *superconducting fault current limiter*

ABSTRACT

CHARACTERISTIC OF INDUCTION MAGNETIK FIELD ON THE LABORATORY SCALE SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER CIRCUIT. Model construction of the laboratory scale superconducting fault current limiter circuit (SFCL) has been performed. The SFCL is fault current limiter and used as electric network security. It mainly consists of a copper coil, a superconducting ring and an iron core that are concentrically arranged. The SFCL circuit is essentially a transformer where the secondary windings are being replaced by the ring of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconductor (HTS). The ring has critical transition temperature $T_c = 92$ K and critical current $I_c = 3.61$ A. Characterization of the SFCL circuit is simulated by ANSYS version 5.4 software. The SFCL circuit consists of load and transformer impedances. The results show that the inductions of magnet field flux in the iron core of primer windings and ring disappear to one other before fault state. It means that impedance of the transformer is zero. After the condition a superconductivity behavior of the ring is disappear so that the impedance of the transformer becomes very high. From this experiment, we concluded that the SFCL circuit could work normally if the resultant of induction magnetic in the iron core (transformer) is zero.

Key words : Induction magnetik field, *superconducting fault current limiter*

PENDAHULUAN

Di era pesatnya perkembangan teknologi sekarang ini dan seiring dengan meningkatnya pertumbuhan jumlah penduduk, maka kebutuhan akan tenaga listrik semakin besar baik di negara yang sedang berkembang maupun negara maju. Hal ini ditunjukkan dengan pembangunan jaringan listrik baik di kota-kota besar sampai di pelosok pedesaan telah tercipta. Namun untuk menghindari terjadinya kecelakaan fatal akibat adanya kerusakan atau hubungan singkat pada jaringan

listrik tersebut, dewasa ini sedang dikembangkan suatu sistem pengaman jaringan listrik yang disebut dengan *Superconducting Fault Current Limiter* (SFCL) model induktif.

SFCL ini merupakan pembatas arus gagal yang bekerja berdasarkan pada perubahan atau transisi fasa yang cepat dari keadaan superkonduktif ke keadaan resistif. Rangkaian SFCL ini merupakan sebuah transformator dengan lilitan primer terdiri dari gulungan

kawat tembaga (Cu) dan lilitan sekunder berupa *ring* superkonduktor [1-4]. Hal yang sangat menarik untuk dikaji dan dipahami adalah fenomena pembatas arus gagal ini.

Selama medan magnet induksi yang dibangkitkan oleh lilitan primer ini tidak melebihi medan magnet induksi balik maksimum yang dibangkitkan oleh *ring* superkonduktor tersebut, maka jaringan atau rangkaian listrik akan berjalan normal, namun apabila sebaliknya maka pada *ring* superkonduktor tersebut akan terjadi perubahan atau transisi fasa dari sifat superkonduktif ke sifat resistif. Hal ini menyebabkan berakibat munculnya impedansi yang sangat besar pada lilitan primer. Pada akhirnya arus yang mengalir pada jaringan atau rangkaian listrik tersebut menjadi sangat kecil dan beban pada rangkaian tersebut tidak akan terbakar atau terlindungi dari kerusakan.

Jadi penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dan memahami fenomena SFCL dengan cara mempelajari karakteristik fluks medan magnet induksi pada rangkaian SFCL.

METODE PERCOBAAN

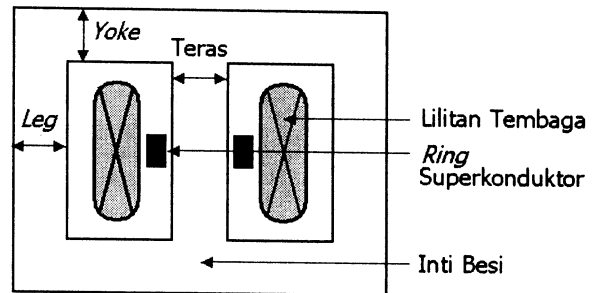
Preparasi *Ring* Superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

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. Pencampuran oksida-oksida tersebut dilakukan di atas *hot plate* dalam bejana gelas yang telah diisi dengan etanol 300 mL kemudian diaduk dengan *magnetik 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 $900\text{ }^\circ\text{C}$ selama 12 jam, setelah itu dicetak dalam bentuk *ring* (cincin) berukuran diameter luar $D_{luar} = 48\text{ mm}$, diameter dalam $D_{dalam} = 28\text{ mm}$, dan ketebalan $t = 2\text{ mm}$, 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. Sampel tersebut *disinter* pada suhu $940\text{ }^\circ\text{C}$ selama 10 jam di dalam aliran udara biasa [5].

Untuk mengetahui sifat superkonduktivitas dilakukan uji *Meissner* dengan cara diletakkan di atas permukaan magnet permanen pada suhu nitrogen cair ($T = 77\text{ K}$). Apabila sampel melayang di atas permukaan magnet tersebut, berarti bahan tersebut bersifat superkonduktor dan sebaliknya. 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) [6].

Pembuatan Model Eksperimen Sederhana dari SFCL Skala Laboratorium

SFCL merupakan sebuah topologi transformator yang terdiri dari komponen inti besi FeSi model-E, *yoke*, *leg* dan kumparan kawat Cu (lilitan primer) yang dililitkan pada sebuah koker. Teras besi tersusun dari 8 buah lempeng FeSi dengan ketebalan lempeng masing-masing 0,51 mm. Bila inti besi dan lilitan primer tersebut digabungkan maka diperoleh sebuah transformator, dimana *ring* $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ sebagai lilitan sekunder diletakkan di antara inti besi dan lilitan primer seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema SFCL skala laboratorium

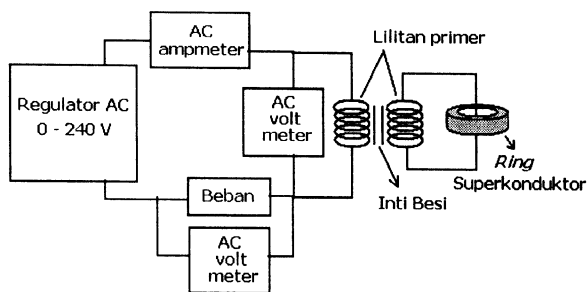
Spesifikasi transformator dan *ring* superkonduktor tersebut ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi transformator untuk SFCL skala laboratorium [9]

Transformator	
Inti besi :	Lilitan Primer :
• Bahan FeSi	• Bahan Kawat tembaga (Cu)
• Teras :	• Diameter kawat 0,55 mm
• Panjang 67,12 mm	• Jumlah lilitan 1250 lilitan
• Lebar 22,33 mm	• Diameter dalam 26,0 mm
• Tebal 5,10 mm	• Diameter luar 33,5 mm
• Yoke :	• Tinggi 55,0 mm
• Panjang 133,12 mm	
• Lebar 22,12 mm	
• Tebal 5,10 mm	
• Teras :	
• Panjang 67,12 mm	
• Lebar 22,18 mm	
• Tebal 5,10 mm	

Sedangkan diagram skematik dari percobaan model sederhana SFCL skala laboratorium diperlihatkan pada Gambar 2.

Pada Gambar 2, sumber tegangan atau arus berupa regulator AC (V_s), AC ampmeter (I_s), AC voltmeter beban (V_b), dan AC voltmeter pada trafo (V_t). Rangkaian tersebut diberikan beban sebesar $1000\ \Omega$, dan dengan meningkatkan sumber tegangan V_s secara perlahan-lahan, dicatat I_s , V_b , dan V_t . Pengukuran pertama, *ring*



Gambar 2. Rangkaian pengujian SFCL skala laboratorium

superkonduktor berada pada lingkungan suhu kamar $T = 300$ K, dan kedua, ring superkonduktor berada pada lingkungan suhu nitrogen cair $T = 77$ K. Percobaan ini dilakukan di Puslitbang Iptek Bahan-BATAN.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Karakterisasi Ring Superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

Tabel 2 merupakan spesifikasi hasil pembuatan sampel ring superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$:

Tabel 2. Spesifikasi ring superkonduktor

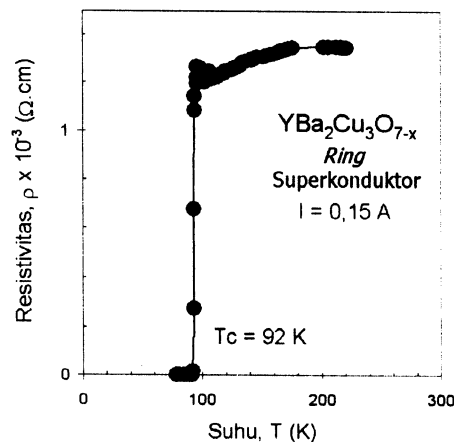
Spesifikasi ring superkonduktor	
• Bahan	$YBa_2Cu_3O_{7-x}$
• Diameter dalam	23,30 mm
• Diameter luar	40,40 mm
• Tebal	6,52 mm
• Susut massa	5 %
• Susut volume	30 %

T_c dari sampel ring ini adalah 92 K, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Kurva T_c ini diperoleh dengan mengukur tegangan sampel pada setiap peningkatan suhu. Kemudian data tegangan tersebut dikonversikan menjadi data resistivitas dengan menggunakan persamaan :

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

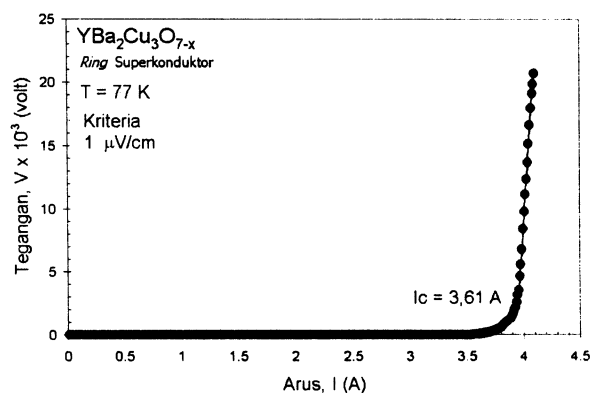
dimana $I = 0,15$ A dan $s = 1,0$ cm [7].

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 ($r > 0$). Sedangkan pada daerah suhu $T < T_c$, bahan bersifat superkonduktif dimana elektron-elektron tersebut saling berpasangan-pasangan (*pairing*) menurut teori *Bardeen Cooper Schrieffer* (BCS) sehingga transport listrik tidak mengalami hamburan ($\rho = 0$) [8].



Gambar 3. Kurva resistivitas terhadap suhu.

Gambar 4 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 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 superkonduktif (*resistive state*). Indikasi ini dapat dilihat dari bentuk linieritas antara tegangan dengan arus.



Gambar 4. Kurva $V-I$ untuk sampel ring superkonduktor

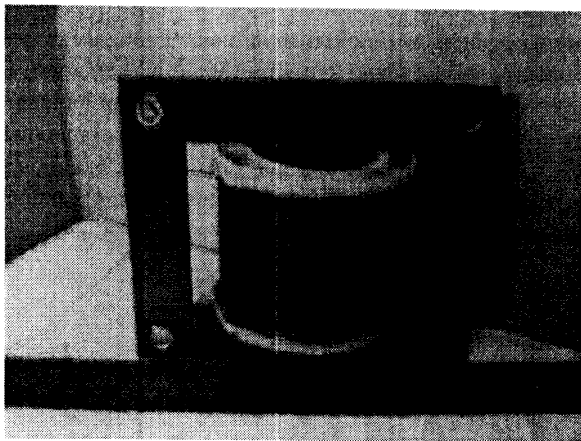
Perubahan perilaku bahan ini yang semula berada pada keadaan superkonduktif kemudian berubah menjadi resistif karena adanya pemutusan pasangan elektron (*depairing*). Berdasarkan pada teori *Bardeen Cooper Schrieffer* (BCS) bahwa energi termal yang dihasilkan akibat aliran arus pada bahan sangat mempengaruhi terhadap besarnya energi (*pair interaction energy*) yang diperlukan untuk pembentukan pasangan elektron (pada superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ disebut dengan *copper pair*). Dan *copper 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 ketidakraturan kisi, yaitu kontribusi tumbukan elektron dengan impuritas, pori (*void*), batas butir yang pada akhirnya akan menimbulkan resistansi pada bahan tersebut.

Hasil Pembuatan Model Eksperimen Sederhana dari SFCL Skala Laboratorium

Hasil preparasi model sederhana dari SFCL skala laboratorium dapat dilihat pada Gambar 5.



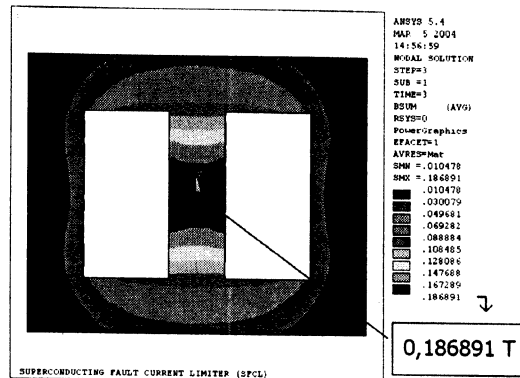
Gambar 5. Model sederhana dari SFCL skala laboratorium [9]

Pada Gambar 5 tampak bahwa rangkaian tersebut merupakan rangkaian tertutup (*close circuit*), sehingga salah satu alternatif untuk mengetahui besarnya fluks medan magnet induksi yang dihasilkan oleh kumparan primer yaitu dengan menggunakan simulasi metode *finite elemen* dengan perangkat lunak/software ANSYS [10]. Adapun rangkaian pada Gambar 5 tersebut dapat dimodelkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

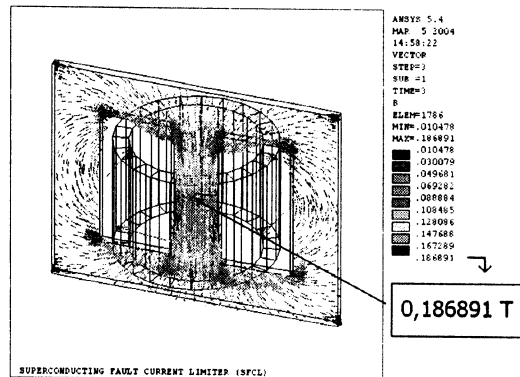
Pada Gambar 6, skala dimensi dari permodelan rangkaian SFCL tersebut adalah 1 : 1. Jadi Gambar

tersebut ukurannya sudah sesuai dengan bentuk sebenarnya.

Untuk menguji kebenaran hasil simulasi tersebut, perlu dimasukkan beberapa parameter, misalkan arus masukkan $I = 0.025$ A, jumlah lilitan $N = 1250$, dan permeabilitas inti besi $\mu_r = 400$ [11]. Simulasi ini dianggap dilakukan pada suhu kamar. Dan hasil pengujian tersebut dapat dilihat seperti pada Gambar 7.



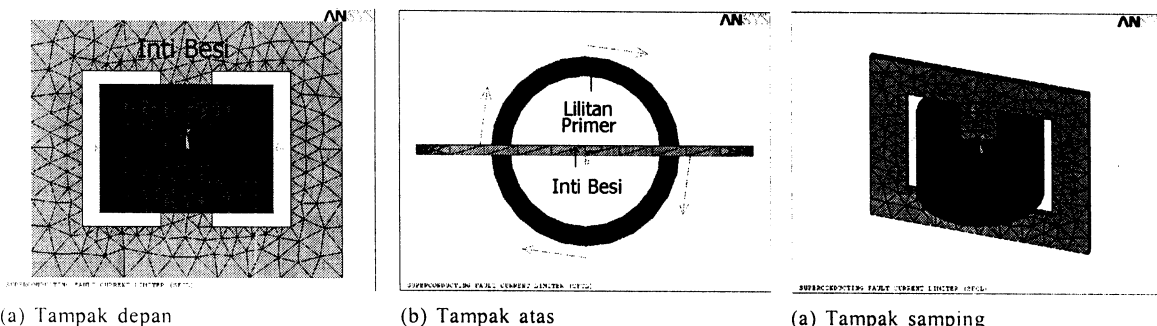
(a) Gradien kerapatan fluks (*nodal*)



(b) Gradien kerapatan fluks (*vector*)

Gambar 7. Hasil simulasi ANSYS rangkaian SFCL tanpa *ring* superkonduktor.

Hasil yang diperoleh dari program ANSYS tersebut dibandingkan dengan perhitungan menurut teori *Axial Field of Finite Solenoid*. Apabila titik pengukuran medan magnet terletak pada pusat dari *solenoid* [12], maka diperoleh rumusan sebagai berikut :

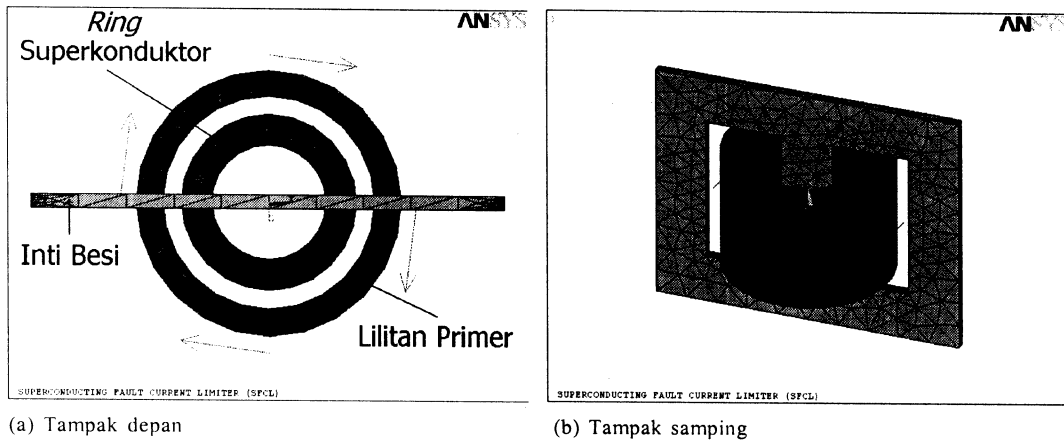


(a) Tampak depan

(b) Tampak atas

(a) Tampak samping

Gambar 6. Permodelan rangkaian SFCL dengan menggunakan program ANSYS



Gambar 8. Permodelan ANSYS rangkaian SFCL dengan ring superkonduktor

$$B = \frac{\mu_0 i N}{2(r_2 - r_1)} \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + (\frac{l}{2})^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + (\frac{l}{2})^2} + r_1} \dots\dots\dots (1)$$

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. Dari perhitungan tersebut diperoleh besar medan magnet induksi di pusat solenoid $B = 0,188388$ Tesla. Sedangkan pada Gambar 8 terlihat bahwa medan magnet induksi di pusat solenoid adalah $B = 0,186891$ Tesla. Ternyata hasil yang diperoleh baik dari analisis program ANSYS maupun dengan perhitungan menunjukkan hasil yang mendekati kecocokan.

Simulasi berikutnya adalah memasukkan ring superkonduktor di antara inti besi dengan lilitan primer. Permodelannya dapat dilihat pada Gambar 8. Simulasi ini juga dianggap dilakukan di suhu kamar. Dengan memasukkan parameter-parameter yang sama dengan simulasi sebelumnya, maka hasil yang diperoleh dari simulasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 9. Dari hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa keberadaan ring superkonduktor di antara inti besi dan kumparan primer

hampir tidak mempengaruhi besarnya medan magnet induksi yang dihasilkan oleh kumparan primer tersebut.

Hasil Pengujian SFCL Skala Laboratorium

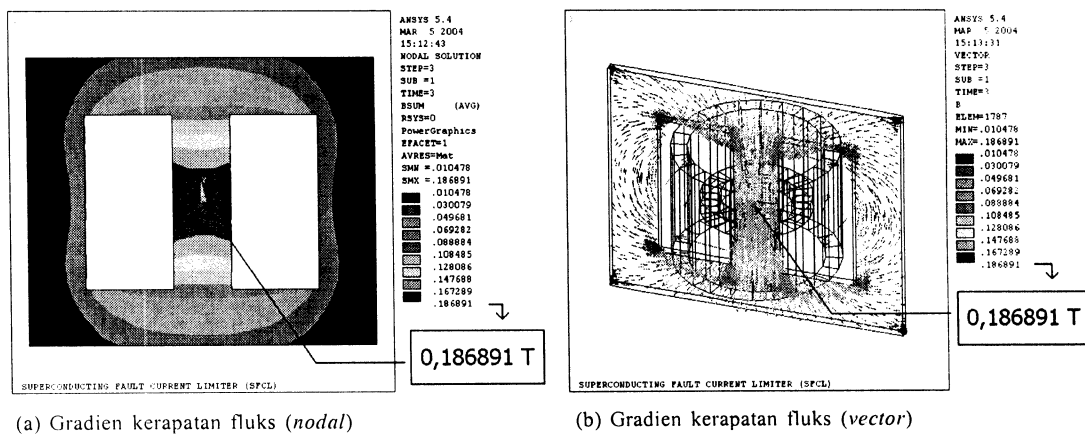
Pada Gambar 10 diperlihatkan hasil pengukuran impedansi beban Z_b , trafo Z_t dan impedansi total Z dari rangkaian SFCL yang diukur pada suhu kamar. Gambar 10 (a) dapat didefinisikan bahwa sudut kemiringan β :

$$\text{Tg } \beta = Y \text{ dan } Y = Z^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

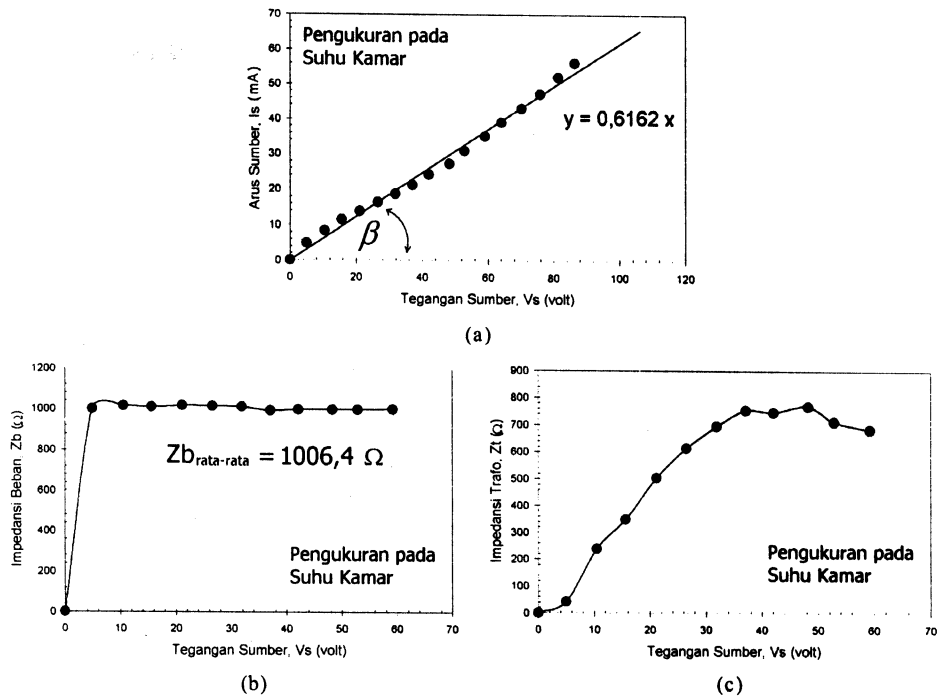
Dimana Y adalah admintansi, sehingga dapat dihitung besarnya sudut β , admintansi, dan impedansi total rata-rata yang berturut-turut adalah $\beta = 31,64^\circ$, $Y = 0,6162 \text{ m}\Omega^{-1}$, $Z = 1622,85 \Omega$. Impedansi total ini meliputi impedansi beban dan trafo (Gambar 10 (b) dan (c)).

$$Z = Z_b + Z_t \dots\dots\dots (2)$$

Pada kondisi rangkaian ini berlaku sistem bagi tegangan antara beban dan trafo. Impedansi beban pada rangkaian serial ini tetap harganya sedangkan impedansi trafo sangat dipengaruhi oleh besarnya medan magnet induksi yang dihasilkan pada kumparan primer tersebut.



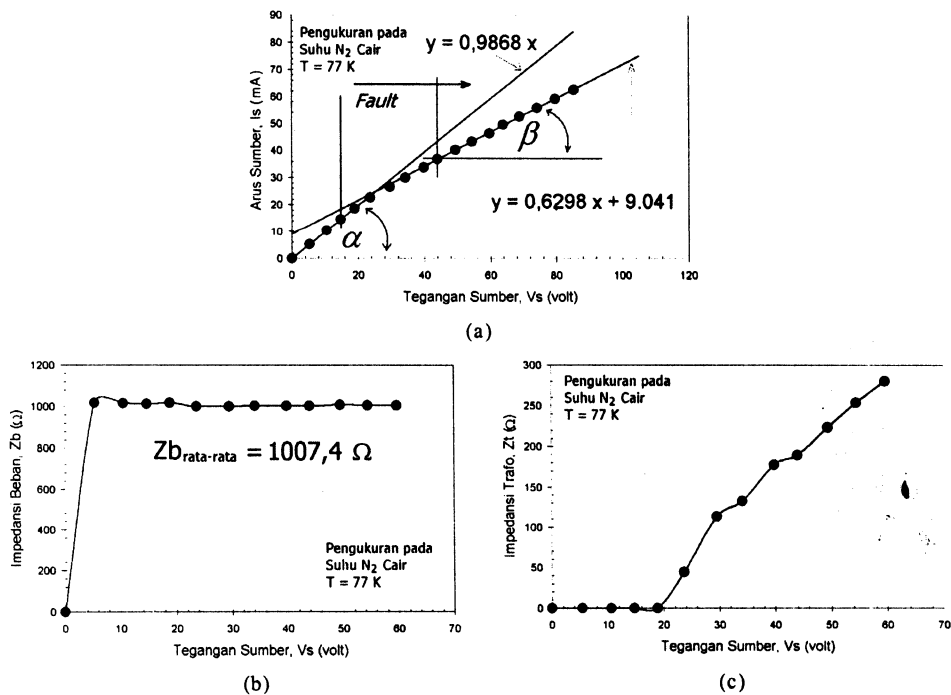
Gambar 9. Hasil simulasi ANSYS rangkaian SFCL dengan ring superkonduktor



Gambar 10. (a) Grafik hubungan Vs-Is pada suhu kamar, (b) Hubungan Vs-Zb pada suhu kamar, (c) Hubungan Vs-Zt pada suhu kamar

Pada Gambar 11 diperlihatkan hasil pengukuran impedansi beban, trafo, dan impedansi total dari rangkaian SFCL yang diukur pada suhu nitrogen cair $T = 77 \text{ K}$. Gambar 11 (a) terlihat ada tiga daerah impedansi, yaitu daerah sebelum transisi (SBT), daerah transisi (TRS), dan daerah setelah transisi (SST). Tampak

pula terjadi perubahan besarnya sudut kemiringan kurva dari α (daerah SBT) ke β (daerah SST). Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi itu terjadi perubahan besarnya impedansi pada rangkaian tersebut. Sudut kemiringan α dapat didefinisikan sebagai :



Gambar 11. (a) Grafik hubungan Vs-Is pada suhu nitrogen cair, (b) Hubungan Vs-Zb pada suhu nitrogen cair, (c) Hubungan Vs-Zt pada suhu nitrogen cair.

$$Tg \alpha = Y \text{ dan } Y = Z^{-1} \dots\dots\dots(3)$$

Sehingga besarnya sudut α , admintansi, dan impedansi total rata-rata yang berturut-turut adalah $\alpha = 44,62^\circ$, $Y = 0,9868 \text{ m}\Omega^{-1}$, $Z = 1013,37 \Omega$.

Pada daerah SBT tidak berlaku sistem bagi tegangan antara beban dan trafo seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11 (b) dan (c). Tampak bahwa impedansi total pada rangkaian tersebut hanya meliputi impedansi beban saja (Gambar 11 (b)), sedangkan impedansi pada trafo adalah nol (Gambar 11 (c)). Hal ini disebabkan impedansi pada trafo sangat dipengaruhi oleh besarnya medan magnet induksi yang dihasilkan pada kumparan primer tersebut. Berdasarkan persamaan dasar dari sebuah induktansi adalah mengikuti hubungan :

$$\phi N = LI \dots\dots\dots(3)$$

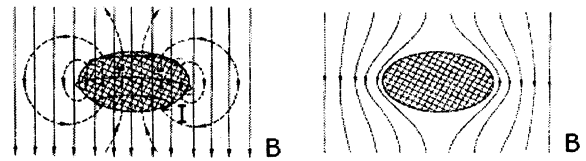
Dan impedansi sebuah induktor pada rangkaian arus bolak-balik adalah [13] :

$$Z = j\omega L \dots\dots\dots(4)$$

Dimana ϕ , N , L , I , $\omega = 2\pi f$, j , dan f berturut-turut adalah fluks medan magnet, jumlah lilitan, induktansi, arus, kecepatan sudut, bilangan kompleks, dan frekuensi. Jadi berdasarkan persamaan (3) dan (4) pada daerah SBT, fluks medan magnet induksi berharga nol ($\phi = 0$), sehingga impedansinya akan berharga nol pula ($Z = 0$).

Apabila ada arus mengalir pada sebuah kumparan primer, maka berarti kumparan itu akan menjadi elektromagnetik. Sehingga dengan sendirinya akan membangkitkan fluks medan magnetik di dalam inti besi yang juga dilingkari oleh *ring* superkonduktor. Karena aliran arus yang masuk berubah-ubah, maka fluks medan magnetik yang terjadi di dalam inti akan berubah-ubah juga mengikuti perubahan aliran arus primer tersebut. Karena *ring* superkonduktor itu melingkari fluks medan magnetik yang berubah-ubah juga maka pada *ring* superkonduktor tersebut terbangkit tegangan dan arus induksi yang arahnya berlawanan dengan arah aliran arus primer sesuai dengan kaidah Hukum Lenz [13-14].

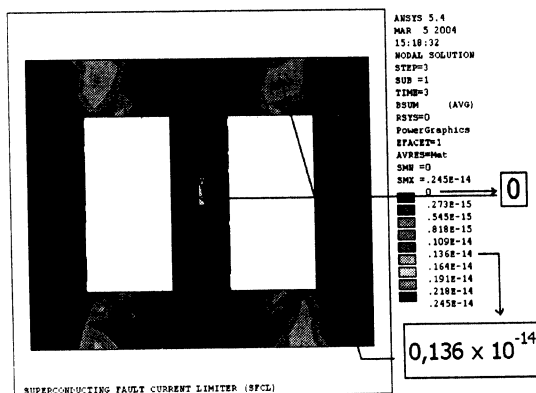
Ternyata hal ini juga diperkuat oleh teori dari *Meissner* yang mengatakan bahwa apabila ada medan magnet luar diterapkan berubah terhadap waktu di dalam bahan superkonduktor maka pada bahan tersebut akan memberikan respon efek perisai yang menolak perubahan medan magnet tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12 [15]. Hal ini berakibat arus induksi yang mengalir di dalam *ring* superkonduktor akan membangkitkan kembali fluks medan magnet induksi yang arahnya berlawanan dengan fluks medan magnet induksi yang dibangkitkan oleh kumparan primer tersebut. Sehingga pada akhirnya akan saling menghilangkan. Dengan kata lain bahwa resultan dari fluks medan magnet induksi yang ada di dalam inti besi adalah nol.



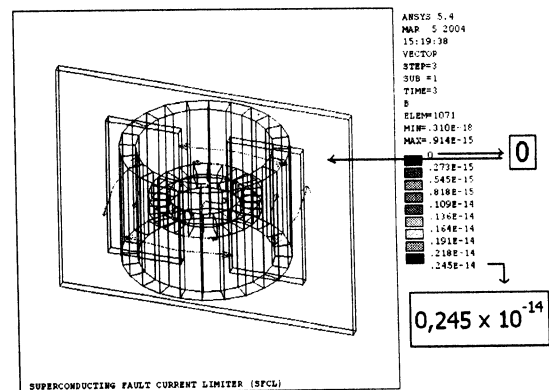
Gambar 12. Efek Meissner pada bahan superkonduktor[15]

Berangkat dari analisa ini, maka dengan memasukkan parameter arus kritis I_c dari *ring* superkonduktor ke dalam program ANSYS, dapat disimulasikan baik besar dan arah fluks medan magnetik induksi yang ada di dalam inti besi tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13. Pada Gambar 13 terlihat bahwa medan magnet induksi di pusat selenoid adalah $B = 0$. Dan medan magnet induksi maksimum yang ada di dalam inti besi tersebut adalah sebesar $B = 0,136 \times 10^{-14}$ T. Medan magnetik induksi ini juga dianggap sangat kecil sekali mendekati nol.

Namun apabila arus yang mengalir di kumparan primer terus dinaikan hingga melebihi medan magnetik induksi yang dibangkitkan oleh ring superkonduktor tersebut maka resultan dari fluks medan magnet induksi yang ada di dalam inti besi tidak sama dengan nol. Hal ini terjadi pada daerah TRS. Peningkatan arus primer



(a) Gradien kerapatan fluks (nodal)



(b) Gradien kerapatan fluks (vector)

Gambar 13. Hasil simulasi ANSYS rangkaian SFCL dengan *ring* superkonduktor

selanjutnya akan menghilangkan sifat superkonduktivitas dari ring superkonduktor tersebut (daerah SST). Dengan meningkatnya fluks medan magnetik induksi pada kumparan primer ini berarti meningkat pula impedansi pada trafo tersebut. Pada akhirnya rangkaian akan kembali pada kondisi semula yaitu bagi tegangan antara beban dan trafo. Hal ini ditandai dengan kemiringan kurva pada Gambar 11 (a) sama dengan kemiringan kurva pada Gambar 10 (a) yang diukur pada suhu ruang.

Sifat superkonduktivitas pada ring ini akan hilang, apabila medan magnet induksi pada kumparan primer yang berhasil menerobos ring tersebut semakin besar. Berdasarkan pada teori *Bardeen Cooper Schrieffer* (BCS) bahwa apabila pada bahan tersebut diterapkan medan magnet sebesar B maka hal ini juga berarti pemberian

energi sebesar $\int_0^B \mu_0 M dB$ kepada bahan tersebut [15].

Penambahan energi ini (peningkatan medan magnet B selanjutnya) pada akhirnya membawa bahan tersebut keluar dari keadaan superkonduktif. Jadi energi ini sama dengan energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron yang berpasangan (*depairing*) menjadi elektron normal. Dengan kata lain bahwa energi ini sebanding dengan selisih energi bebas antara keadaan superkonduktif dengan keadaan normal.

KESIMPULAN

Karakteristik medan magnet induksi pada rangkaian SFCL skala laboratorium telah dilakukan. Pada kondisi sebelum gagal (*fault*), fluks medan magnet induksi yang dibangkitkan oleh kumparan primer dan ring superkonduktor pada rangkaian SFCL saling menghilangkan. Resultan dari fluks medan magnet induksi yang ada di dalam inti besi (trafo) sama dengan nol. Hal ini berarti bahwa impedansi pada trafo juga sama dengan nol. Pada kondisi setelah gagal (*fault*), sifat superkonduktivitas dari ring hilang akibat medan magnet induksi yang dibangkitkan oleh kumparan primer sehingga impedansi pada trafo berubah menjadi sangat besar. Sehingga dapat disimpulkan bahwa rangkaian SFCL ini akan bekerja dengan baik (normal) apabila resultan dari medan magnet induksi pada inti besi (trafo) sama dengan nol.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Drs. Gunandjar, S.U. selaku Kepala Puslitbang Iptek Bahan, kepada DR. Ridwan selaku Kepala Bidang Bahan Maju P3IB BATAN yang telah memberikan kesempatan untuk penelitian, kepada almarhum DR. Wuryanto, APU atas perjuangannya membangun kelompok Superkonduktor, Dra. Grace Tj. Sulungbudi, M.Sc. selaku anggota kelompok superkonduktor, saudara Jeni Susanto yang

telah banyak membantu dalam pengujian dan semua pihak yang telah membantu dalam kelancaran penulisan makalah ini.

DAFTAR ACUAN

- [1]. NORRIS, W.T., POWER, A., *Cryogenic* **37** (1997) 657-665
- [2]. CURRAS, S.R., SANTOS, R., DOMARCO, G., DIAZ, A., VEIRA, J.A., MAZA, J., FRANCOIS, M.X., VIDAL, F., *Cryogenic* **37** (1997) 653-655
- [3]. ACERO, J., GARCIA TABARES, L., BAJKO, M., CALERO, J., *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, **5** (2), (1995), 1071-1074
- [4]. W. PAUL, TH. BAUMANN, J. RHYNER AND F. PLATTER, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, **5** (2), (1995), 1059-1062
- [5]. SUKIRMAN, E., *Pengaruh Distribusi Kekosongan Oksigen pada Superkonduktivitas $YBa_2Cu_3O_7$* , Thesis Master Fakultas Pasca Sarjana Universitas Indonesia (1991)
- [6]. WISNU ARI ADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **1** (3), (2000)
- [7]. WISNU ARI ADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA, GRACE TJ. SULUNGBUDI, *Majalah BATAN*, ISSN 0303-2876, **.XXXIV**, (1/2), (2001) 15-30
- [8]. BUCKEL, W., *Superconductivity*, VCH Publisher Inc., New York, (1991) 112-159
- [9]. SUKIRMAN, S., WISNU, A.A., WINATAPURA, S.W., SIREGAR, R.S., *Pembuatan dan Karakterisasi Superconducting Fault Current Limiter Skala Laboratorium*, Prosiding Seminar Nasional Penelitian Pengelolaan Perangkat Nuklir (P3N), Yogyakarta, (2003)
- [10]. MOAVENI, S., *Finite Element Analysis, Theory and Application with ANSYS*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey (1999).
- [11]. ZANNELLA, S., JANSACK, J., DONADIO, P., *Cryogenics* **37** (1997) 667-670.
- [12]. SMYTHE, WR., *Static and Dinamic Electricity*, McGraw-Hill, New York, (1950), 266.
- [13]. BUDIONO MISMAIL, *Rangkaian Listrik*, Penerbit ITB, Bandung, (1997).
- [14]. SYAMHARDY, *Dasar-dasar Teknik Listrik Aliran Rata* (3), Edisi I, Penerbit PT. Bina Aksara, Jakarta, (1983).
- [15]. ROSE-INNES, A.C., RHODERICK, E.H., *Introduction to Superconductivity*, Pergamon Press, Oxford, (1969), 17-110.