

PENGARUH MEDAN MAGNET INDUKSI TERHADAP PEMBATASAN ARUS PADA SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER SKALA LABORATORIUM

Wisnu Ari Adi, Engkir Sukirman, Didin S. Winatapura dan Yustinus P.

Puslitbang Iptek Bahan (P3IB) - BATAN
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang 15314

ABSTRAK

PENGARUH MEDAN MAGNET INDUKSI TERHADAP PEMBATASAN ARUS PADA SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER SKALA LABORATORIUM. *Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* 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 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (STT). SFCL diuji pada rangkaian uji dengan memvariasikan tiga buah *ring* STT. Analisis terhadap medan magnet yang dibangkitkan oleh lilitan primer dan *ring* STT disimulasikan dengan *software* ANSYS versi 5.4. Hasil simulasi menunjukkan bahwa medan magnet induksi pada *ring* STT dapat ditingkatkan dengan menambah jumlah tumpukan *ring* STT. Sedangkan hasil pengujian menunjukkan bahwa arus gagal I_{fault} pada rangkaian uji SFCL dengan 1 *ring*, 2 *ring* dan 3 *ring* STT berturut-turut adalah 26 mA, 41 mA dan 44 mA. Jadi arus gagal I_{fault} meningkat dengan bertambahnya jumlah tumpukan *ring*. Disimpulkan bahwa pembatasan arus pada SFCL dapat ditingkatkan dengan menaikkan medan magnet induksi dengan cara menambah jumlah tumpukan *ring* STT.

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

ABSTRACT

THE INDUCTION MAGNETIC FIELD EFFECT TO THE CURRENT LIMITATION ON THE LABORATORY SCALE OF SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER. The SFCL is fault current limiter used as power line security. It mainly consists of a copper coil, a superconducting ring and an iron core that are concentrically arranged. The SFCL design is essentially a transformer where the secondary windings are being replaced by the ring of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconductor (HTS). The SFCL was tested in a test circuit by varying 3 HTS ring, namely 1, 2 and 3 rings. The analysis of induction magnetic field of the SFCL circuit is simulated by software of ANSYS version 5.4. The simulation result shows that the induction magnetic field on the HTS rings is able to be increased by adding the number of the ring stack in the iron core. The measurement result shows that value of fault current with 1, 2 and 3 rings are 26, 41 and 44 mA, respectively. Thus, the fault currents improve by increasing the number the ring stack in the iron core. We concluded that the current limitation on the SFCL can be improved by increasing the induction magnetic field on the HTS ring.

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

PENDAHULUAN

Pengaman jaringan listrik SFCL (*Superconducting Fault Current Limiter*) model induktif adalah pembatas arus gagal yang bekerja berdasarkan perubahan transisi fasa yang cepat dari keadaan superkonduktif ke keadaan resistif. Rangkaian SFCL ini adalah sebuah transformator yang tersusun dari lilitan primer berupa gulungan kawat tembaga (Cu) dan lilitan sekunder berupa *ring* superkonduktor suhu tinggi $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ [1-4].

Pada penelitian sebelumnya [4] telah dipelajari karakteristik medan magnet induksi pada rangkaian SFCL skala laboratorium. Apabila ada arus mengalir pada kumparan primer, maka berarti kumparan itu akan menjadi elektromagnetik. Sehingga dengan sendirinya akan membangkitkan fluks medan magnet di dalam inti besi yang juga dilingkari oleh *ring* superkonduktor.

Karena aliran arus yang masuk berubah-ubah, maka fluks medan magnet yang terjadi di dalam inti akan berubah-ubah mengikuti perubahan aliran arus primer tersebut. Karena *ring* superkonduktor itu melingkari fluks medan magnet yang berubah-ubah juga maka pada *ring* superkonduktor tersebut terbangkitlah tegangan dan arus induksi yang arahnya berlawanan dengan arah aliran arus primer sesuai dengan Hukum Lenz dan efek Meissner [5-6]. 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 yang dibangkitkan oleh kumparan primer, dan pada akhirnya akan saling menghilangkan dengan syarat arus induksi tersebut tidak melebihi arus kritis bahan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa SFCL ini dapat

bekerja dengan baik (normal) apabila jumlah medan magnet induksi dan medan magnet primer pada inti besi (trafo) sama dengan nol [7]. Namun inti permasalahan yang ingin dijawab adalah seberapa besar arus yang mengalir pada rangkaian SFCL dapat dibatasi?

Besarnya arus yang mengalir pada rangkaian SFCL ini bergantung dari berapa besar medan magnet induksi yang masih mampu dibangkitkan oleh ring superkonduktor tersebut. Sedangkan besarnya medan magnet induksi yang dibangkitkan oleh ring superkonduktor bergantung pada suhu pengukuran (T), rapat arus kritis bahan (J_c), medan magnet kritis bahan (H_c), jumlah lilitan (N), dan dimensi ring.

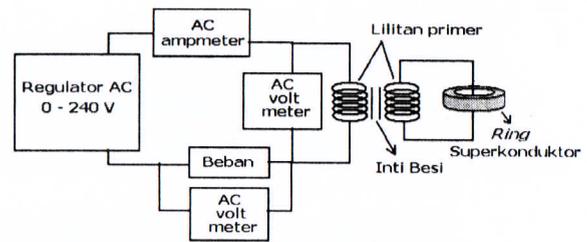
J_c dan H_c ini merupakan sifat superkonduktivitas bahan, dimensi ring dianggap sama, dan suhu pengukuran ditetapkan pada lingkungan nitrogen cair $T = 77$ K, sehingga salah satu alternative yang dapat meningkatkan medan magnet induksi pada ring superkonduktor adalah memvariasikan jumlah ring (N).

Pada percobaan ini digunakan variasi jumlah ring dengan cara menumpuk ring tersebut dengan jumlah tertentu. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh medan magnet induksi pada ring (variasi tumpukan ring) terhadap pembatasan arus pada SFCL skala laboratorium. Penambahan jumlah tumpukan ring diharapkan dapat meningkatkan besarnya pembatasan arus pada rangkaian SFCL tersebut

METODE PERCOBAAN

Sampel superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dibuat melalui reaksi padatan dari pencampuran oksida-oksida penyusun, yaitu Y_2O_3 , $BaCO_3$, dan CuO dengan perbandingan stoikiometri unsur $Y : Ba : Cu = 1 : 2 : 3$. Proses pembuatan sampel bentuk ring ini telah dipublikasikan dalam penelitian sebelumnya [8, 9]. 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 bentuk ring ini dibuat sebanyak 3 buah. Untuk mengetahui sifat superkonduktivitas dilakukan uji *Meissner* dengan cara meletakkan ring di atas permukaan magnet permanen pada suhu nitrogen cair ($T = 77$ K). Apabila sampel melayang di atas permukaan magnet tersebut, berarti bahan bersifat superkonduktor atau sebaliknya bersifat non superkonduktor.

Diagram skematik dari percobaan model sederhana SFCL skala laboratorium juga sudah dilaporkan pada penelitian terdahulu seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1. Pada Gambar 1 tersebut, sumber tegangan atau arus berupa regulator AC dinotasikan dengan V_s , ampmeter AC untuk mengukur arus yang mengalir pada rangkaian dinotasikan dengan I_s , voltmeter AC untuk mengukur tegangan



Gambar 1. Rangkaian pengujian SFCL skala laboratorium [7]

beban dinotasikan dengan V_b , dan voltmeter AC untuk mengukur tegangan trafo dinotasikan dengan V_t . Rangkaian tersebut diberi beban sebesar 1000Ω , dan dengan meningkatkan sumber tegangan V_s secara perlahan-lahan, dicatat I_s , V_b , dan V_t . Pengukuran dilakukan pada suhu kamar $T = 300$ K dan lingkungan nitrogen cair $T = 77$ K. Masing-masing pengukuran menggunakan ring superkonduktor dengan variasi jumlah tumpukan ring (1, 2 dan 3 buah). Percobaan ini dilakukan di Puslitbang Iptek Bahan-BATAN.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil karakterisasi ketiga ring superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ dapat merujuk pada penelitian sebelumnya [7,9]. Pada Gambar 2 dan Gambar 3 diperlihatkan hasil pengukuran V_b dan V_s dari rangkaian SFCL dengan 1 ring, 2 ring, dan 3 ring yang diukur pada suhu kamar. Sehingga dapat dihitung besarnya Y_b , Y , Z_b , dan Z rata-rata pada suhu kamar. Y_b , Y , Z_b , Z , I_s , V_b , dan V_s berturut-turut adalah admitansi beban, admitansi total, impedansi beban, impedansi total, arus sumber, tegangan beban, dan tegangan sumber.

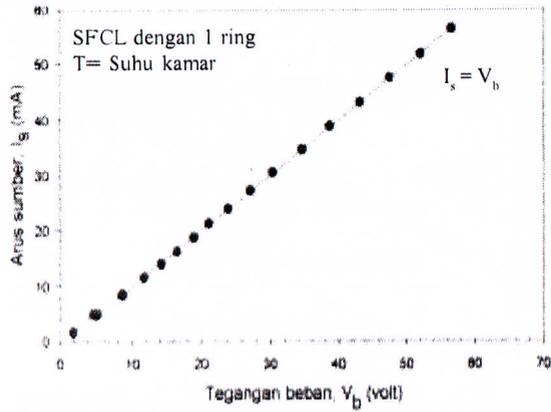
Pada Tabel 1 diberikan hasil evaluasi impedansi total yang meliputi impedansi beban dan trafo. Pada kondisi ini rangkaian berlaku sistem bagi tegangan antara beban dan trafo.

Tabel 1. Hasil perhitungan Y_b , Y , Z_b , dan Z rata-rata pada suhu kamar

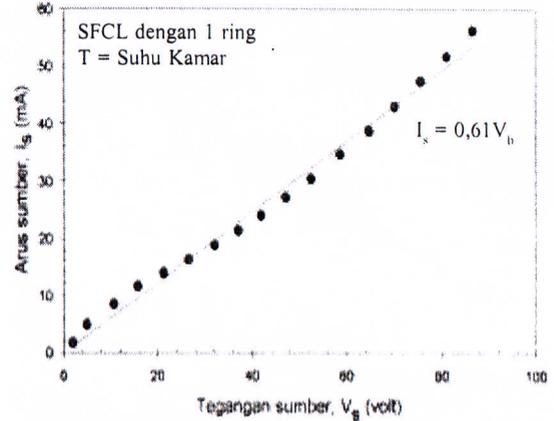
Jumlah ring	Y_b ($m\Omega^{-1}$)	Z_b (Ω)	Y ($m\Omega^{-1}$)	Z (Ω)
1	1	1000	0,61	1639
2	1	1000	0,62	1613
3	1	1000	0,67	1493

Pada Gambar 4 dan Gambar 5 memperlihatkan hubungan yang sama antara arus dan tegangan beban terukur namun pada kondisi ring didinginkan pada suhu N_2 cair. Sedangkan hasil evaluasi untuk menentukan admintansi dan impedansi beban diberikan pada Tabel 2 baik untuk kondisi sebelum dan sesudah *fault*.

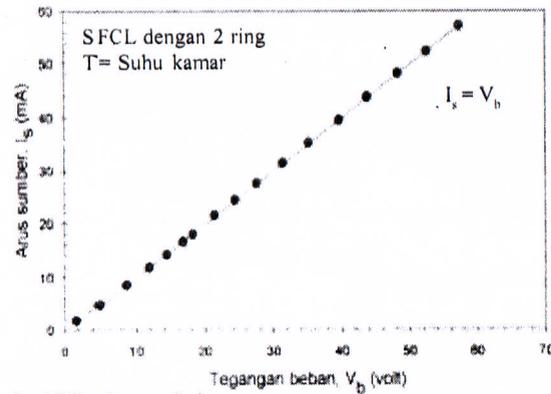
Pada Gambar 2 tampak bahwa impedansi beban yang diukur pada suhu kamar relatif konstan $Z_b = 1000 \Omega$. Sedangkan pada Gambar 3 tampak bahwa



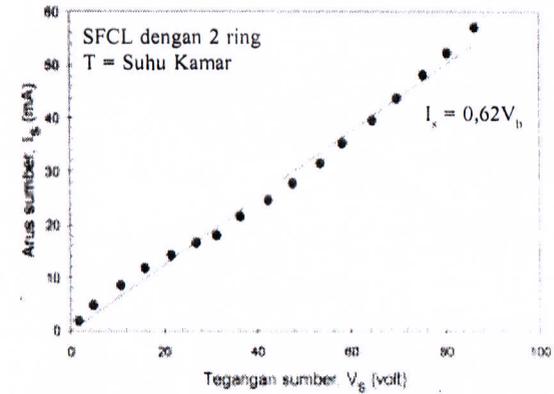
(a) SFCL dengan 1 ring



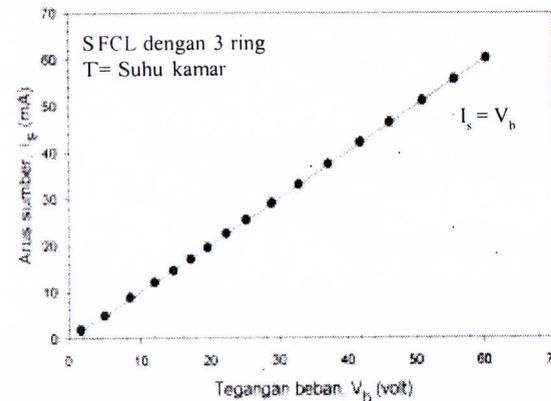
(a) SFCL dengan 1 ring



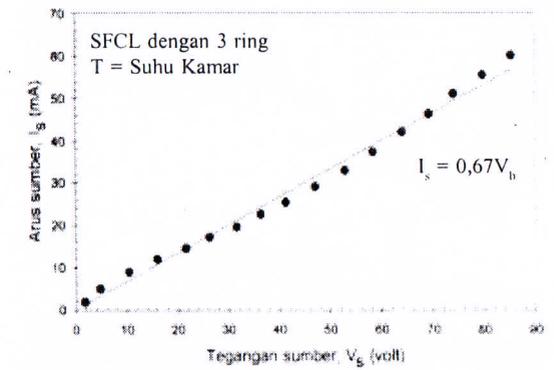
(b) SFCL dengan 2 ring



(b) SFCL dengan 2 ring



(c) SFCL dengan 3 ring



(c) SFCL dengan 3 ring

Gambar 2. Impedansi beban (Z_b) pada suhu

Tabel 2. Hasil perhitungan Y_n , Z_b , Y , dan Z rata-rata pada suhu nitrogen cair

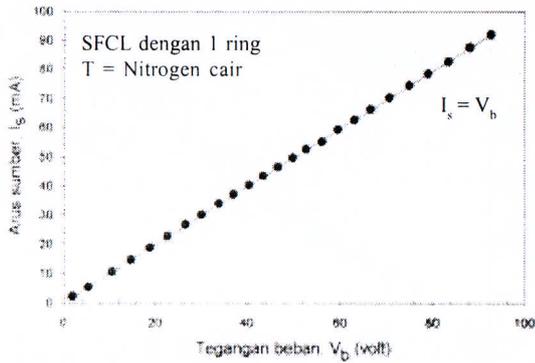
Jumlah Ring	Y_b ($m\Omega^{-1}$)	Z_b (Ω)	Kondisi sebelum fault		Kondisi sesudah fault	
			Y	Z	Y	Z
			($m\Omega^{-1}$)	(Ω)	($m\Omega^{-1}$)	(Ω)
1	1	1000	1	1000	0,61	1639
2	1	1000	1	1000	0,62	1613
3	1	1000	1	1000	0,67	1493

Gambar 3. Impedansi total (Z) pada suhu kamar

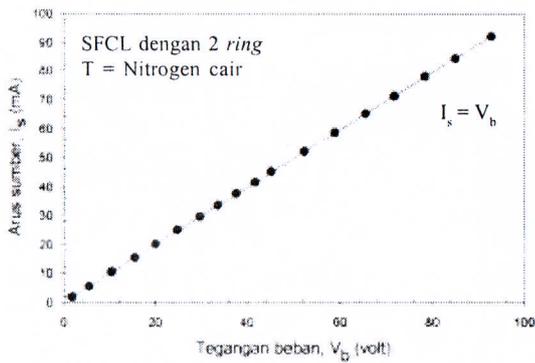
impedansi total semakin berkurang dengan bertambahnya jumlah *ring*. Impedansi beban pada rangkaian serial ini harganya tetap sedangkan impedansi trafo sangat dipengaruhi oleh besarnya medan magnet induksi yang dihasilkan pada kumparan primer. Persamaan dasar impedansi sebuah induktor pada rangkaian arus bolak-balik adalah mengikuti hubungan [5] :

$$Z = \frac{j\omega\phi N}{I} \dots\dots\dots (1)$$

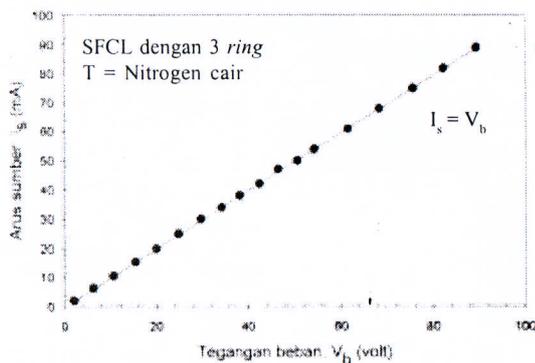
dimana ϕ , N , I , $\omega (= 2\pi f)$, j dan f berturut-turut adalah rapat fluks medan magnet, jumlah lilitan, arus, kecepatan



(a) SFCL dengan 1 ring



(b) SFCL dengan 2 ring

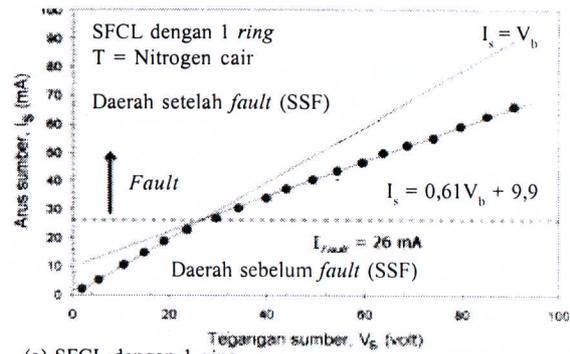


(c) SFCL dengan 3 ring

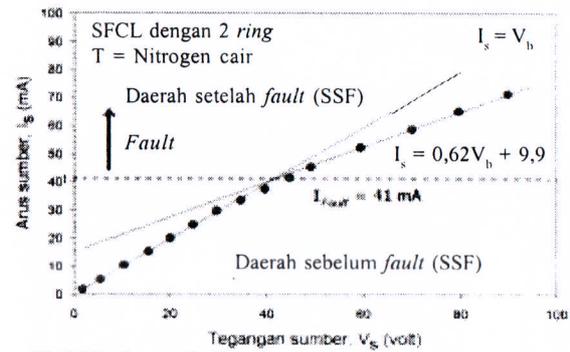
Gambar 4. Impedansi beban (Z_b) pada suhu nitrogen cair

sudut, bilangan kompleks, dan frekuensi. Dari persamaan (3) terlihat bahwa impedansi trafo dipengaruhi oleh ϕ , N , I , dan f . Jadi pada Gambar 3 rapat fluks medan magnet induksi yang mengalir pada inti besi semakin berkurang, ditandai dengan berkurangnya impedansi total pada rangkaian SFCL tersebut. Hal ini dijelaskan dengan pembahasan Gambar 5 berkenaan dengan kaidah Hukum Lenz. Semakin banyak jumlah ring yang melingkari inti besi semakin berkurang jumlah fluks medan magnet induksi yang mengalir dalam inti besi tersebut. Berdasarkan persamaan (1), impedansi sebuah induktor berkurang apabila jumlah fluks medan magnet berkurang.

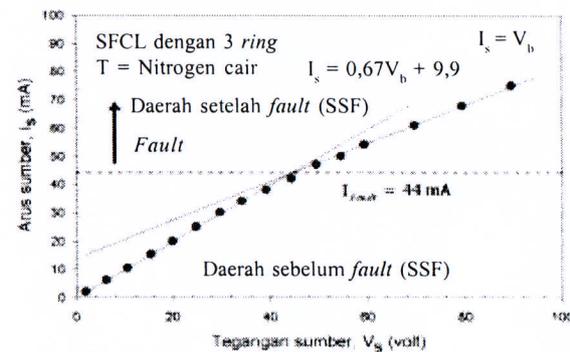
Pada Gambar 4 terlihat bahwa impedansi beban yang diukur pada suhu nitrogen cair juga relatif konstan



(a) SFCL dengan 1 ring



(b) SFCL dengan 2 ring



(c) SFCL dengan 3 ring

Gambar 5. Impedansi total (Z) pada suhu nitrogen cair

$Z_b = 1000 \Omega$. Namun pada Gambar 5 tampak adanya perubahan besarnya impedansi total yang diukur pada suhu nitrogen cair. Pada suhu nitrogen cair ini, ring superkonduktor bersifat diamagnetik sempurna. Pada Gambar 5 terlihat ada dua daerah impedansi, yaitu daerah sebelum fault (SBF) dan daerah setelah fault (SSF). Hal ini diperlihatkan dengan terjadinya perubahan pada besarnya gradient persamaan garis lurus dari daerah SBF ke daerah SSF. Jadi berdasarkan persamaan (1) pada daerah SBF, fluks medan magnet induksi berharga nol ($\phi = 0$), sehingga impedansi pada trafo berharga nol pula ($Z_t = 0$). Pada daerah SBF tidak berlaku sistem bagi tegangan antara beban dan trafo. Tampak bahwa impedansi total pada rangkaian tersebut hanya meliputi impedansi beban saja sedangkan impedansi pada trafo adalah nol.

Berdasarkan kaidah Hukum Lenz dan teori dari Efek Meissner, apabila ada arus bolak-balik 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 ring superkonduktor itu dilingkari fluks medan magnetik yang berubah terhadap waktu maka pada ring superkonduktor tersebut terbangkitkan tegangan dan arus induksi yang arahnya berlawanan dengan arah aliran arus primer [5-7]. 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, sehingga pada akhirnya akan saling menghilangkan. Dengan kata lain bahwa resultan dari fluks medan magnet induksi yang ada di dalam inti besi adalah nol.

Namun apabila arus yang mengalir di kumparan primer terus dinaikkan 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. Peningkatan arus primer selanjutnya akan menghilangkan sifat superkonduktivitas dari ring superkonduktor tersebut seperti pada daerah SSF. Sifat superkonduktivitas ring ini akan hilang, apabila medan magnet yang dibangkitkan kumparan primer melebihi medan magnet kritis bahan (H_c). Berdasarkan teori Bardeen Cooper Schrieffer (BCS) bahwa apabila pada bahan tersebut diterapkan medan magnet sebesar H maka hal ini juga berarti pemberian energi sebesar

$$\int_0^H \mu_0 M dH \text{ kepada bahan tersebut [10]. Penambahan}$$

energi lebih lanjut (peningkatan medan magnet H) akan menyebabkan bahan bertransisi ke keadaan non superkonduktor. Jadi energi ini sama dengan energi yang diperlukan untuk memisahkan ikatan elektron-elektron yang berpasangan (*depairing*) menjadi elektron normal. Dengan meningkatnya fluks medan magnet pada kumparan primer berarti meningkat pula impedansi trafo tersebut. Pada akhirnya rangkaian akan kembali pada kondisi semula yaitu berbagi tegangan antara beban dan trafo. Hal ini ditandai dengan perubahan besarnya *gradient* garis lurus tersebut yang berarti bahwa impedansi total bertambah. Pada kondisi ini besarnya impedansi total sama dengan impedansi total yang diukur pada suhu kamar.

Berangkat dari hasil percobaan ini, untuk mengetahui besar dan arah fluks medan magnet yang ada di dalam inti besi dan ring superkonduktor tersebut maka digunakan simulasi dengan bantuan program ANSYS 5.4 [11]. Berdasarkan teori *Axial Field of Finite Solenoid*, apabila titik pengukuran medan magnet terletak pada pusat dan sepanjang sumbu *solenoid* [12], maka diperoleh rumusan sebagai berikut:

(a) *Coil* tunggal dengan B pada pusat *solenoid*

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

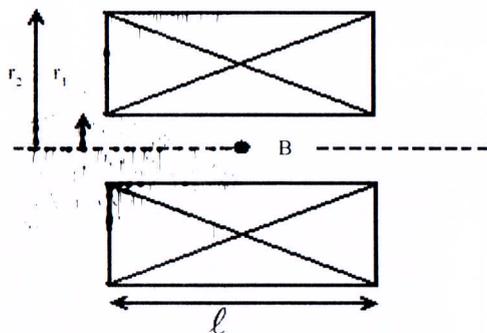
(b) *Coil* tunggal dengan B sembarang titik sepanjang sumbu *solenoid*

$$B_x = \frac{\mu_0 IN}{2(r_2 - r_1)\ell} \left[x_2 \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + x_2^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_2^2} + r_1} - x_1 \ln \frac{\sqrt{r_2^2 + x_1^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + x_1^2} + r_1} \right] \dots (3)$$

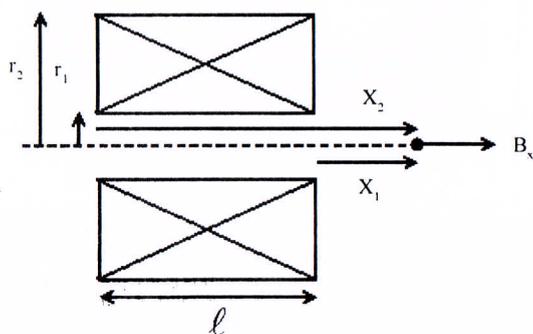
dimana B , B_x , μ_0 , I , N , r_1 , r_2 , x_1 , x_2 , dan ℓ berturut-turut adalah medan magnet di pusat *solenoid*, medan magnet pada sembarang titik sepanjang sumbu *solenoid* yang sejajar sumbu *solenoid*, permeabilitas udara ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$), arus, jumlah lilitan, jari-jari dalam *solenoid*, jari-jari luar *solenoid*, jarak sepanjang sumbu dari ujung *solenoid* ke titik pengukuran medan magnet dan panjang lilitan.

Pada Gambar 8 dan Gambar 9 merupakan hasil simulasi besar dan arah fluks medan magnet yang ada di dalam inti besi dan ring superkonduktor dengan arus I bergantung pada jumlah ring superkonduktor, jumlah lilitan $N = 1250$, permeabilitas udara $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, dan permeabilitas relatif inti besi $\mu_r = 120$.

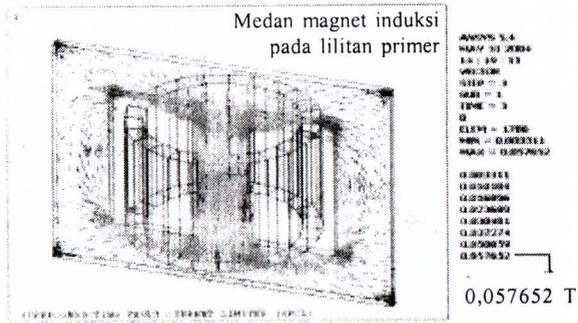
Distribusi fluks medan magnet induksi sebagai fungsi dari jarak teras besi untuk ring superkonduktor ditunjukkan pada Gambar 10 a dan Gambar 10 b. Pada Gambar 10 b tampak bahwa distribusi medan magnet induksi B sebagai fungsi jarak d pada teras besi



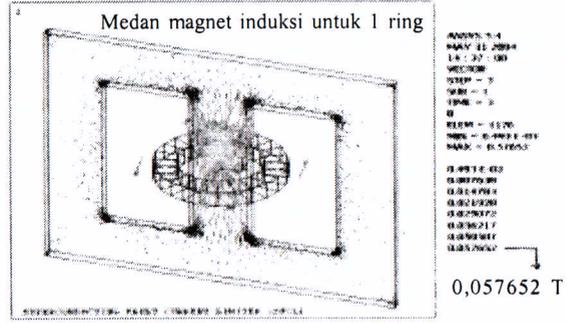
Gambar 6. B di pusat *solenoid*



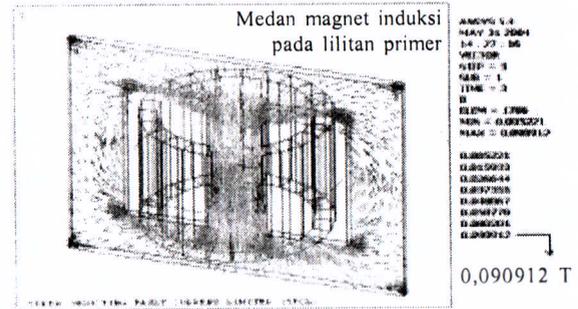
Gambar 7. B di sepanjang sumbu *solenoid*



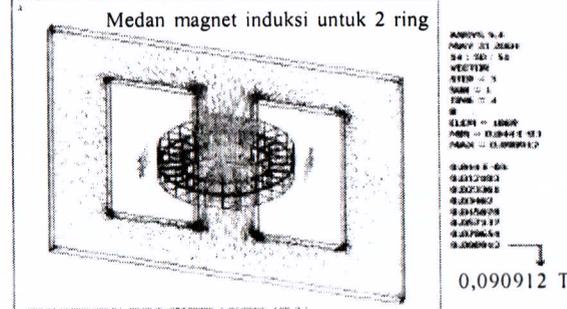
(a) Lilitan primer untuk 1 ring



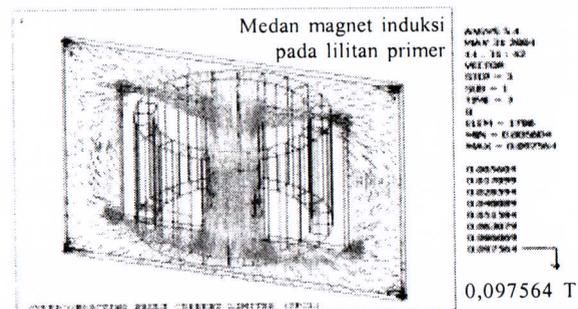
(a) 1 ring



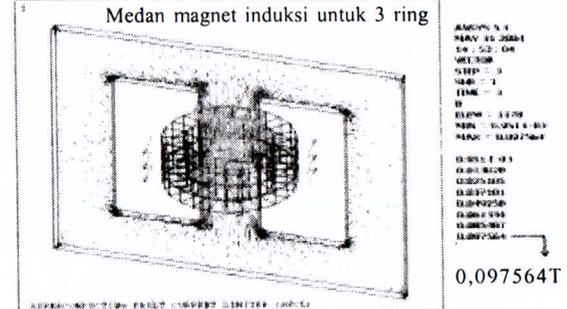
(b) Lilitan primer untuk 2 ring



(b) 2 ring



(c) Lilitan primer untuk 3 ring



(c) 3 ring

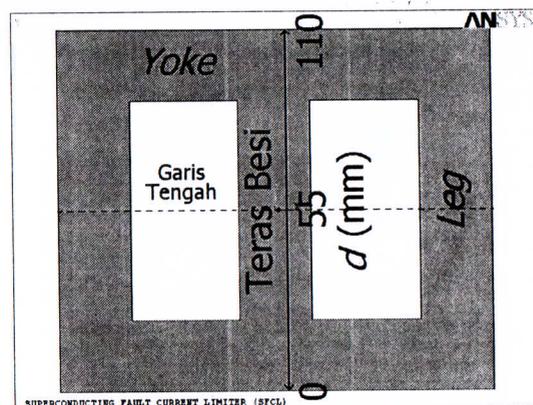
Gambar 8. Hasil simulasi kerapatan fluks medan magnet pada lilitan primer (vector)

Gambar 9. Hasil simulasi kerapatan fluks medan magnet pada ring superkonduktor (vector)

membentuk kurva *Gaussian*. Medan magnet induksi B yang paling tinggi terletak di titik tengah teras besi.

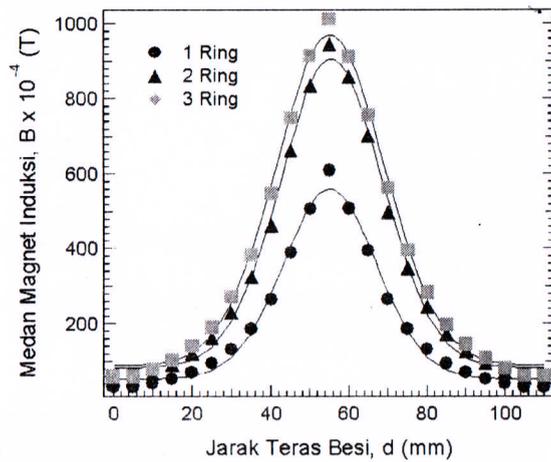
Analisis dengan menggunakan simulasi ANSYS 5.4 menunjukkan bahwa penambahan jumlah ring superkonduktor pada rangkaian SFCL ini dapat meningkatkan medan magnet induksi B pada ring. Sedangkan dari hasil percobaan penambahan jumlah ring dapat meningkatkan besarnya arus gagal I_{fault} pada rangkaian SFCL. Jadi semakin tinggi medan magnet induksi yang dibangkitkan oleh ring superkonduktor, maka semakin tinggi pula arus yang dapat dibatasi pada rangkaian SFCL seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12.

Pada Gambar 12 tampak bahwa semakin banyak jumlah ring superkonduktor yang ditumpuk, maka semakin tinggi arus yang dapat dibatasi. Hal ini berarti bahwa kemampuan pembatas arus meningkat. Namun penambahan ring selanjutnya I_{fault} cenderung mengalami saturasi. Dengan kata lain laju kenaikan I_{fault} tidak

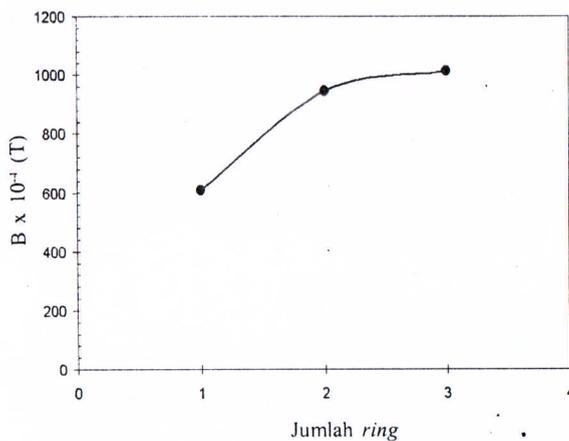


Gambar 10 (a). Jarak teras besi d

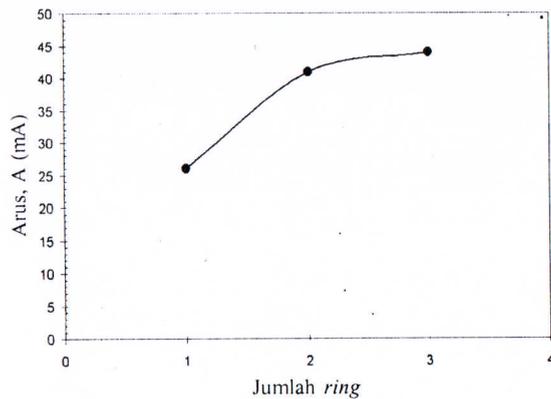
signifikan. Analisis dengan menggunakan simulasi ANSYS 5.4 menunjukkan bahwa distribusi medan magnet induksi sebagai fungsi jarak membentuk kurva *Gaussian*. Dengan demikian arus induksi pada ring superkonduktor juga akan berbentuk kurva *Gaussian*.



Gambar 10 (b). Hasil simulasi untuk distribusi B terhadap jarak teras besi d pada ring superkonduktor



Gambar 11. Hasil simulasi pengaruh B terhadap jumlah ring superkonduktor



Gambar 12. Pengaruh penambahan jumlah ring terhadap arus gagal I_{fault}

Jadi apabila posisi ring tersebut semakin jauh dari titik tengah teras besi maka arus induksi pada ring tersebut semakin kecil, sehingga medan magnet induksi yang dibangkitkan oleh arus induksi pada ring tersebut juga semakin rendah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10 dan Gambar 11. Apabila ada 3 ring yang melingkari teras besi, maka ring di tengah memberikan

respon medan magnet induksi paling besar, sedangkan ring yang berada di atas dan di bawah ring di tengah akan memberikan respon medan magnet induksi yang jauh lebih rendah sesuai dengan kemiringan kurva Gaussian tersebut. Jumlah medan magnet induksi yang dibangkitkan oleh ketiga ring merupakan resultan dari integrated medan magnet induksi menurut kurva Gaussian tersebut. Jadi dengan penambahan jumlah ring berikutnya akan menyumbangkan medan magnet induksi yang cukup kecil, karena berada pada posisi yang jauh dari ring di tengah. Penambahan medan magnet induksi yang cukup kecil ini pada akhirnya akan mengalami saturasi.

KESIMPULAN

Pengujian rangkaian SFCL skala laboratorium dengan menggunakan 3 variasi jumlah ring STT, yaitu 1 ring, 2 ring, dan 3 ring telah dilakukan. Hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa besarnya arus gagal I_{fault} dengan 1 ring, 2 ring, dan 3 ring STT berturut-turut adalah 26 mA, 41 mA, dan 44 mA. Sedangkan Analisis dengan menggunakan simulasi ANSYS 5.4 menunjukkan bahwa penambahan jumlah ring STT dapat meningkatkan medan magnet induksi pada ring STT. Besarnya medan magnet induksi dengan 1 ring, 2 ring, dan 3 ring STT hasil simulasi ANSYS 5.4 berturut-turut adalah 576,52 Gauss; 909,12 Gauss; dan 975,64 Gauss. Jadi penambahan jumlah ring STT dapat meningkatkan arus gagal I_{fault} yang berarti bahwa kemampuan pembatasan arus meningkat. Dengan demikian disimpulkan bahwa peningkatan medan magnet induksi pada ring dapat meningkatkan kemampuan pembatasan arus. Namun apabila jumlah tumpukan lebih dari 2 ring STT maka peningkatan medan magnet induksi pada ring cenderung mengalami saturasi sehingga mengakibatkan peningkatan pembatasan arus juga cenderung saturasi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Drs. Gunandjar, S.U. selaku Kepala P3IB-BATAN, kepada DR. Ridwan selaku Kepala BBM P3IB BATAN yang telah memberikan kesempatan untuk penelitian, kepada Dra. Grace Tj. Sulungbudi, M.Sc. selaku anggota kelompok superkonduktor, Dra. Mujamilah, M.Sc. atas bantuannya dalam identifikasi sifat magnet bahan superkonduktor, Riswal H. Siregar, S.Si. staf P2PN yang telah membantu mempersiapkan rangkaian pengujian dan semua pihak yang telah membantu dalam kelancaran penulisan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. W. PAUL, TH. BAUMANN, J. RHYNER and F. PLATTER, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, **5** (1995) 1059-1062.

- [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** (1995) 1071-1074
- [4]. 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)
- [5]. BUDIONO MISMAIL, *Rangkaian Listrik*, Penerbit ITB, Bandung, (1997)
- [6]. SYAM HARDY, *Dasar-dasar Teknik Listrik Aliran Rata (3)*, Edisi I, Penerbit PT. Bina Aksara, Jakarta, (1983)
- [7]. WISNU ARI ADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA, YUSTINUS M. P., dan RISWAL H. SIREGAR, Karakteristik Medan Magnet Induksi pada Superconducting Fault Current Limiter Skala Laboratorium, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **5** (3) (2004)
- [8]. SUKIRMAN, E., Pengaruh Distribusi Kekosongan Oksigen pada Superkonduktivitas $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, *Thesis Master Fakultas Pasca Sarjana*, Universitas Indonesia, (1991)
- [9]. WISNU ARI ADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA dan ARI HANDAYANI, Pembuatan dan Karakterisasi Ring $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ untuk Fault Current Limiter Skala Laboratorium, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **5**(2) (2004)
- [10]. ROSE-INNES, A.C., RHODERICK, E.H., *Introduction to Superconductivity*, Pergamon Press, Oxford, (1969) 17-110
- [11]. MOAVENI, S., *Finite Element Analysis, Theory and Application with ANSYS*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, (1999)
- [12]. SMYTHE, WR., *Static and Dynamic Electricity*, McGraw-Hill, New York, (1950) 266

TANYAJAWAB

Abarul Ikram, P3IB-BATAN

Pertanyaan

1. Apa perbedaan antara kesimpulan anda dengan hukum LENZ
2. Sebaiknya di-explore sebanyak mungkin data eksperimen maupun ANSYS-nya.

Jawaban

1. Pembatasan arus pada *superconductor fault current* limiter dapat ditingkatkan dengan menaikkan medan magnet induksi pada ring STT. Hal ini sangat beresesuaian dengan kaidah Hukum LENZ. Peningkatan medan magnet induksi pada ring ini berasal dari penumpukan ring STT dengan jumlah tertentu.
2. Hal ini memang perlu di-explore lebih jauh untuk meningkatkan keakurasian penelitian; yaitu dengan bervariasikan tinggi dari ring STT tersebut. Jadi bukan lagi jumlah ring namun pengaruh tinggi dari dimensi ring terhadap peningkatan medan magnet induksi pada ring.

Eko Sulistiyono, P2M-LIPI

Pertanyaan

1. Bagaimana pada proses pencampuran supaya homogen. Apakah sudah digunakan proses kimia.

Jawaban

1. Sudah digunakan proses kimia dengan metode sol gel. Dengan metode ini diperoleh hasil yang cukup baik seperti homogenitas, ukuran butir dan superkonduktivitasnya, tetapi dari segi kuantitas relatif sedikit dibandingkan jumlah pencampuran awalnya.