

## PENGARUH DIMENSI, ARUS KRITIS, DAN JUMLAH RING TERHADAP ARUS GAGAL PADA SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER

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

Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN) - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang

### ABSTRAK

**PENGARUH DIMENSI, ARUS KRITIS, DAN JUMLAH RING TERHADAP ARUS GAGAL PADA SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER.** Penelitian *Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* di Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir telah dilakukan sejak tahun 2002. Mulai tahun 2003 hingga 2005, penelitian difokuskan pada upaya meningkatkan arus gagal dengan memperbesar dimensi trafo, meningkatkan arus kritis bahan, dan menambah jumlah *ring*. Pada tahun 2003 dapat dibuat *SFCL* skala laboratorium yang mampu membatasi arus gagal  $I_f = 26$  mA. *SFCL* semiprototipe baru bisa diwujudkan pada tahun 2004 dan pada tahun berikutnya dilakukan optimasi teoritis pada model *SFCL* semiprototipe tersebut. Pada *SFCL* semiprototipe mula-mula dipasang *ring*  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  yang memiliki arus kritis  $I_c = 3,52$  A, kemudian diganti dengan *ring* yang memiliki  $I_c = 9,6$  A. Demikian pula jumlah *ring*  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , semula hanya satu, kemudian ditambah menjadi dua. Pengujian rangkaian *SFCL* dilengkapi dengan simulasi menggunakan *software ANSYS* versi 5.4. Hasil pengujian *SFCL* menunjukkan bahwa arus gagal meningkat menjadi sekitar 110 mA, 365 mA dan 490 mA berturut-turut akibat peningkatan dimensi trafo, arus kritis dan jumlah *ring*. Arus gagal  $I_f$  dapat ditingkatkan hingga 20 kali lebih tinggi dengan memperbesar dimensi trafo, meningkatkan arus kritis, dan menambah jumlah *ring*  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ .

**Kata kunci :** *SFCL*, dimensi trafo, arus kritis, jumlah *ring*, arus gagal

### ABSTRACT

**EFFECT OF DIMENSION, CRITICAL CURRENT, AND AMOUNT OF RING ON THE FAULT CURRENT ON SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER.** The Research of Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) at Technology Center for Nuclear Industrial Materials has been performed since at 2002. Starting at 2003 till 2005, the research are focused on the effort improve the fault current by enlarging transformer dimension, improving critical current of materials, and add the amount rings. In the 2003 can be made a SFCL of scale lab capable to limit the fault current  $I_f = 26$  mA. New semi prototype SFCL just can be realized in at 2004 and next in the year performed the theoretical optimization at the semi prototype of SFCL model. The originally of semi prototype SFCL is attached the  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  ring with critical current  $I_c = 3.52$  A, and then changed by ring with  $I_c = 9.6$  A. Thus also sum up the ring  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , from the beginning only one, and then added to become two. The examination of Network SFCL provided by the simulation use the software ANSYS version 5.4. The result of SFCL examination show that the fault current increase to become about 110, 365 and 490 mA, effect of enlarging the transformer dimension, increasing the critical current, and adding the amount of ring, respectively. The fault current  $I_f$  can be improved till 20 higher times by enlarging transformer dimension, increasing the critical current, and add the amount of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  ring.

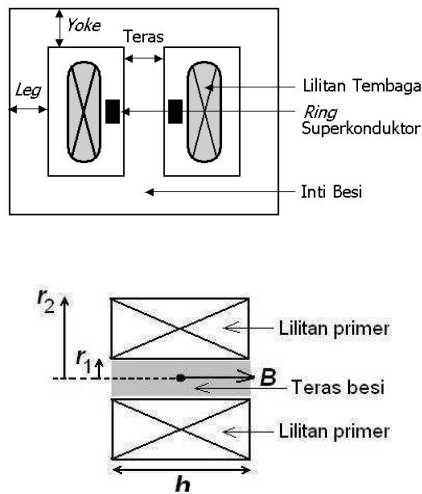
**Key words :** SFCL, transformer dimension, critical current, amount of ring, fault current

### PENDAHULUAN

*Superconducting Fault Current Limiter (SFCL)* merupakan pembatas arus gagal yang bekerja berdasarkan pada perubahan atau transisi fasa yang cepat dari keadaan superkonduktif ke keadaan resistif. Rangkaian *SFCL* model induktif pada dasarnya memiliki topologi transformator dengan lilitan primer terdiri dari gulungan kawat tembaga (Cu) dan lilitan sekunder berupa *ring* superkonduktor. *Ring*  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  ditumpuk sehingga menyerupai tabung dan selanjutnya disebut

tabung  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . Jadi, *SFCL* adalah transformator dimana kumparan sekundernya dihubung-singkatkan. Tabung  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  tersebut direndam di dalam  $\text{N}_2$  cair agar tabung  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  menampilkan fenomena superkonduktivitas. Oleh karena itu, bekerjanya *SFCL* ini bergantung pada suhu. Gambar 1 adalah penampang lintang *SFCL* model induktif. Pada saat *ring* bersifat superkonduktif, impedansi trafo nol ( $Z_t = 0$ ) dan saat *ring* normal, impedansi trafo tidak sama dengan nol

( $Z_i \neq 0$ ). Berdasarkan fenomena ini maka SFCL tersebut dapat digunakan sebagai sistem pengamanan jaringan listrik [1-3].



Gambar 2. Penampang lintang solenoid [7].

Penelitian SFCL ini telah dilakukan sejak tahun 2002. Pada awalnya, penelitian ini dimaksudkan untuk membuktikan adanya fenomena arus gagal. Karena fenomena arus gagal terbukti ada, maka pada tahun 2003 penelitian dilanjutkan dengan membuat SFCL skala laboratorium. Medan magnet yang dibangkitkan oleh lilitan primer dan ring disimulasikan dengan software ANSYS versi 5.4. Hasil simulasi menunjukkan bahwa medan magnet induksi pada ring dapat ditingkatkan dengan menambah jumlah ring. SFCL skala laboratorium diuji dengan memvariasikan tiga buah ring, dan hasil pengujian menunjukkan bahwa arus gagal  $I_F$  pada rangkaian uji SFCL dengan 1 ring, 2 ring dan 3 ring berturut-turut adalah 26 mA, 41 mA dan 44 mA. Jadi arus gagal  $I_F$  meningkat dengan bertambahnya jumlah ring [4-6]. Namun arus gagal yang diperoleh pada penelitian tahun 2003 ini masih rendah, sehingga diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan arus gagal tersebut.

Berdasarkan teori [7], ada beberapa faktor untuk dapat memperbesar arus gagal tersebut, yaitu dengan meningkatkan rapat arus kritis bahan superkonduktor ( $I_c$ ), menambah jumlah ring ( $N_r$ ), mengurangi jumlah lilitan primer ( $N_1$ ), dan ukuran dimensi trafo SFCL ( $G_t$ ). Selanjutnya pada tahun 2004, penelitian SFCL ini diarahkan pada upaya peningkatan dimensi trafo yang kemudian disebut dengan SFCL semiprototipe [8]. Dan pada tahun 2005, penelitian SFCL semiprototipe ini diarahkan pada upaya untuk optimasi SFCL semiprototipe melalui peningkatan arus kritis bahan dan penambahan jumlah ring [9]. Namun demikian, optimasi SFCL tersebut baru dilakukan dalam tataran teori dan modeling. Pada penelitian sekarang dicoba dilakukan eksperimen peningkatan batas arus gagal dengan meningkatkan arus kritis ( $I_c$ ) dan menambah jumlah ring ( $N_r$ ) pada SFCL semiprototipe.

Model SFCL yang telah dikembangkan oleh Zannella S. dan Cave, J.R. [10-11] seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dapat digunakan sebagai referensi untuk pengembangan SFCL semiprototipe.

Tabel 1. Model SFCL yang dikembangkan oleh Zannella dan Cave

Zannella		Cave	
FeSi inti besi			
Penampang inti besi, A (cm <sup>2</sup> )	3,24	Penampang inti besi, A (cm <sup>2</sup> )	5,7
Permeabilitas, $\mu_r$	400	Permeabilitas, $\mu_r$	70
Lilitan primer			
Jumlah lilitan, N	271	Jumlah lilitan, N	200
Tinggi lilitan, h (cm)	7,7	Tinggi lilitan, h (cm)	44
Diameter, D (cm)	5	Diameter, D (cm)	3,8
Resistansi pada 77 K, R ( $\Omega$ )	0,14	Resistansi pada 77 K, R ( $\Omega$ )	1,7
Ring superkonduktor			
Bahan	Bi-2212	Bahan	Bi-2212
Diameter ring, D (cm)	3,6	Diameter ring, D (cm)	2,8
Ketebalan (cm)	0,45	Ketebalan (cm)	0,3
Tinggi, h (cm)	10	Tinggi, h (cm)	4 x 5
$J_c$ pada 77 K (A.cm <sup>-2</sup> )	800	$J_c$ pada 77 K (A.cm <sup>-2</sup> )	500
Hasil pengujian			
Power fault (kVA)	0,5/3	Power fault (VA)	233
Fault current, $I_F$ (A)	10	Fault current, $I_F$ (A)	70

Arus kritis ( $I_c$ ) ditingkatkan dengan cara melakukan modifikasi bahan, yakni dengan memperkecil ukuran serbuk, dan selanjutnya dilakukan proses pelelehan (*melt textured growth*). Jumlah ring ( $N_r$ ) ditambah menjadi dua buah, ditumpuk pada teras dijadikan sebagai lilitan sekunder. Besarnya peningkatan batas arus gagal yang dapat dicapai dan pembahasan tentang faktor-faktor yang dapat meningkatkan arus gagal pada SFCL dibahas dalam makalah ini. Jadi tujuan makalah ini adalah menjelaskan faktor-faktor yang mempengaruhi peningkatan arus gagal pada Superconducting Fault Current Limiter (SFCL).

## TEORI

Pada Gambar 2 ditunjukkan ilustrasi penampang lintang sebuah solenoid. Medan magnetik induksi yang dihasilkan pada pusat solenoid memenuhi persamaan :

$$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I_1 \cdot N_1}{2(r_2 - r_1)} \ln \left\{ \frac{\sqrt{r_2^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2} + r_1} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

dimana, B = medan magnet induksi,  $\mu_0$  = permeabilitas udara,  $\mu_r$  = permeabilitas relatif,  $I_1$  = arus primer,  $N_1$  = jumlah lilitan primer,  $r_1$  = jari-jari dalam lilitan primer,  $r_2$  = jari-jari luar lilitan primer dan h = tinggi lilitan primer [6]. Medan magnet induksi pada lilitan primer pada persamaan (1) dapat disederhanakan menjadi :

$$B_t = \frac{\mu_0 \mu_r I_F N_t}{G_t} \dots \dots \dots (2)$$

dimana,  $B_t$ ,  $I_F$ , dan  $N_p$  berturut-turut adalah medan magnet induksi pada lilitan primer (trafo), arus gagal dan jumlah lilitan primer. Sedangkan  $G_r$  adalah dimensi lilitan primer (trafo) yang besarnya memenuhi persamaan :

$$G_r = 2(r_2 - r_1) \ln \left\{ \frac{\sqrt{r_2^2 + (h/2)^2} + r_2}{\sqrt{r_1^2 + (h/2)^2} + r_1} \right\}^{-1}$$

Medan magnet induksi pada lilitan sekunder (*ring* superkonduktor) pada persamaan (1) dapat disederhanakan menjadi :

$$B_r = \frac{\mu_0 \mu_r I_c N_r}{G_r} \dots\dots\dots (3)$$

dimana  $B_r$ ,  $I_c$ ,  $N_r$ , dan  $G_r$  berturut-turut adalah medan magnet induksi pada *ring*, arus kritis bahan *ring* superkonduktor, jumlah *ring* dan dimensi *ring*.

Syarat terjadinya fenomena superconducting fault current limiter adalah munculnya medan magnet induksi pada lilitan primer yang sama dengan induksi medan magnet induksi pada *ring* superkonduktor.

$$B_t = B_r \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{I_F N_t}{G_t} = \frac{I_c N_r}{G_r} \dots\dots\dots (5)$$

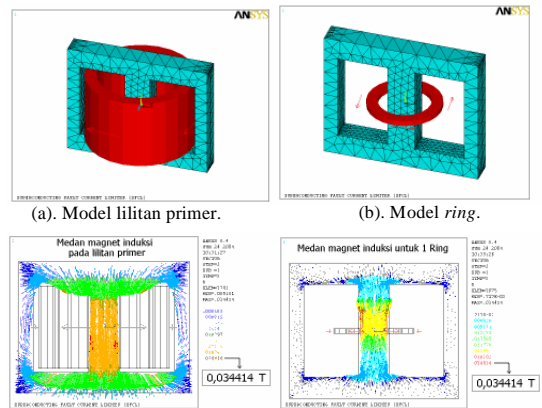
$$I_F = I_c \frac{N_r G_t}{N_t G_r} \dots\dots\dots (6)$$

Tampak dari persamaan (6) bahwa besarnya arus gagal  $I_F$  bergantung pada rapat arus kritis  $I_c$ , jumlah *ring*  $N_r$ , dimensi trafo  $G_t$  baik teras maupun lilitan primer (parameter  $r_1$  dan  $r_2$ ), jumlah lilitan trafo  $N_t$ , dan dimensi *ring*  $G_r$ .

### Simulasi SFCL Semiprototipe Dengan ANSYS 5.4

*Abaqus (General Purpose Non Linear Finite Element Analysis)*, *ADINA finite element system (Linear and Non Linear Mechanic)*, *Algor (Finite Element Analysis for Mechanic)*, *Amaze-3D (Finite Element Analysis for Electromagnetic)* dan *ANSYS (General Purpose)* merupakan *software-software* simulasi yang sering digunakan untuk permodelan. Setiap *software* memiliki karakteristik tertentu dalam penggunaannya. Namun ANSYS dapat digunakan untuk berbagai aplikasi permodelan. Dan kelebihan lain dari ANSYS ini adalah pemakaiannya cukup sederhana, sehingga untuk simulasi SFCL semiprototipe ini digunakan *software* ini.

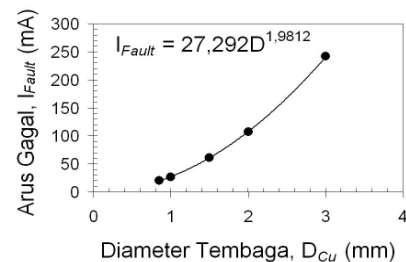
Gambar 3 ditunjukkan pemodelan dan hasil distribusi medan magnet baik lilitan primer maupun sekunder (*ring*) pada SFCL dengan



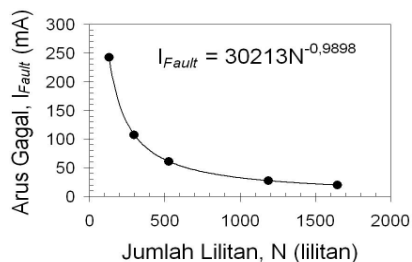
Gambar 3. Permodelan rangkaian SFCL dengan menggunakan program ANSYS

menggunakan metode *finite elemen* menggunakan *software ANSYS 5.4* [12]. Skala permodelan rangkaian SFCL tersebut adalah 1 : 1, sehingga ukuran model sesuai dengan bentuk yang sebenarnya. Dengan memasukan arus  $I = I_c = 13$  A,  $N_r = 1$ ,  $m_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  dan  $m_r = 120$ , maka dapat disimulasikan besar dan arah fluks medan magnet yang ada di dalam inti besi dan *ring* superkonduktor.

Pada Gambar 4 dan Gambar 5 diperlihatkan pengaruh jumlah lilitan primer  $N_t$  dan diameter kawat tembaga  $D_{Cu}$  terhadap besarnya arus gagal  $I_F$ .



Gambar 4. Hubungan antara  $D_{Cu}$  dan  $I_F$ .



Gambar 5. Hubungan antara  $N_t$  dan  $I_F$ .

Besar arus gagal  $I_{fault}$  sebagai fungsi jumlah lilitan primer  $N_t$  dan diameter kawat tembaga  $D_{Cu}$  hasil simulasi diperlihatkan pada Tabel 2.

### METODE PERCOBAAN

#### Preparasi ring Superkonduktor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

Bahan superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  dibuat dengan metode reaksi padatan dari percampuran

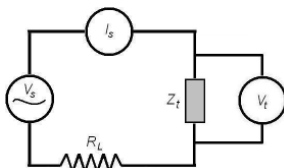
No.	$D_{Cu}$ (mm)	$N$ (lilitan)	$I_{Fault}$ (mA)
1.	0,85	1647	20
2.	1,00	1190	27
3.	1,50	528	61
4.	2,00	297	107
5.	3,00	132	242

oksida-oksida penyusun, yaitu :  $Y_2O_3$ ,  $BaCO_3$ , dan  $CuO$  dengan perbandingan stokiometri unsur  $Y : Ba : Cu = 1 : 2 : 3$ . Teknik preparasi *ring* superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  dan karakterisasinya merujuk pada penelitian sebelumnya [13]. Untuk meningkatkan arus kritis  $I_c$  bahan ini dilakukan proses *milling* atau penghalusan serbuk selama 5 jam dengan menggunakan *Ball Mill* di PTBIN BATAN [14]. Sedangkan pengukuran suhu transisi kritis  $T_c$  dan rapat arus kritis  $J_c$  sampel diukur menggunakan alat ukur V-I dengan metode *Four Point Probe (MFPP)* [15].

### Pengujian SFCL

Diagram skematik rangkaian uji *SFCL* diperlihatkan pada Gambar 6, dimana  $V_s$  = tegangan sumber,  $I_s$  = arus sumber,  $V_t$  = tegangan trafo,  $Z_t$  = Impedansi trafo, dan  $R_L$  = hambatan beban. Karakterisasi *SFCL* dilakukan dengan menentukan hubungan antara arus sumber  $I_s$  terhadap tegangan sumber  $V_s$ .

Rangkaian tersebut diberi beban  $R_L$  yang harganya bervariasi, dan dengan meningkatkan tegangan sumber  $V_s$  secara perlahan-lahan, dicatat  $I_s$ ,  $V_b$ , dan  $V_t$ . Pengukuran pertama, *ring* superkonduktor berada pada lingkungan suhu kamar  $T = 300$  K dan pada pengukuran kedua, *ring* superkonduktor berada pada lingkungan suhu nitrogen cair  $T = 77$  K. Percobaan ini dilakukan di PTBIN – BATAN.



## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dimensi sampel *ring* ditunjukkan pada Tabel 3. Pada Tabel 3 tampak bahwa dimensi sampel *ring* (baik

Tabel 3. Spesifikasi hasil pembuatan sampel ring superkonduktor  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ .

Nama sampel	Dimensi sampel (mm)						Keterangan
	Setelah proses kalsinasi			Setelah proses sintering			
	Diameter $\Phi_{dalam}$	Diameter $\Phi_{luar}$	Tebal $t$	Diameter $\Phi_{dalam}$	Diameter $\Phi_{luar}$	Tebal $t$	
ring1	27,95	47,95	7,17	23,46	40,66	6,84	Skala lab. [6]
ring2	67,10	94,10	6,40	57,40	80,90	5,50	Semiprototipe [8]

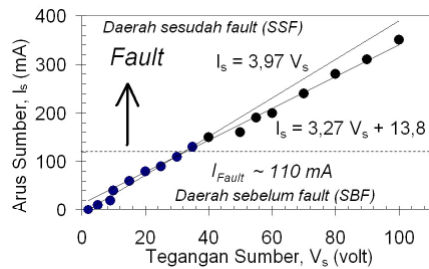
*ring1* maupun *ring2*) mengalami penyusutan (*shrinkage*). Setelah proses sintering penyusutan terjadi akibat proses difusi antar butir, sehingga rongga-rongga disekitar butir-butir tersebut berkurang dan geometri *ring* menjadi lebih kecil dari sebelumnya.

*SFCL* merupakan sebuah topologi transformator yang terdiri dari komponen inti besi FeSi model-E, yoke, leg, teras besi dan kumparan kawat Cu (lilitan primer) yang dililitkan pada sebuah koker, sedangkan *ring*  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  sebagai lilitan sekunder diletakkan di antara inti besi dan lilitan primer seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Pada awalnya disain dimensi *SFCL* cukup kecil yang kemudian disebut *SFCL* skala laboratorium, kemudian ukurannya diperbesar yang selanjutnya disebut *SFCL* semiprototipe seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Pada Tabel 4 tampak semua komponen *SFCL* skala laboratorium baik teras besi, yoke, leg maupun lilitan primer diperbesar ukurannya. Berdasarkan teori pada persamaan (2) bahwa dimensi sampel berbanding lurus dengan jari-jari dalam lilitan primer ( $r_1$ ), jari-jari luar lilitan primer ( $r_2$ ) dan tinggi lilitan primer ( $h$ ). Sehingga untuk memperbesar dimensi *SFCL* dapat digunakan trafo nomor 170 yang memiliki panjang teras 8,5 cm (inti besi terbesar yang ada di pasaran). Namun demikian, peningkatan dimensi trafo dan  $I_c$  *ring* tidak bisa terus dilakukan karena harus mempertimbangkan selain teknis pembuatan juga faktor biaya produksi.

Tabel 4. Spesifikasi trafo dan lilitan primer *SFCL*.

SFCL skala laboratorium [6]			SFCL semiprototipe [10]		
Komponen	Parameter	Nilai (cm)	Komponen	Parameter	Nilai (cm)
Teras besi	Bahan	FeSi	Teras besi	Bahan	FeSi
	Panjang	6,71		Panjang	13,60
	Lebar	2,23		Lebar	3,00
	Tebal	0,51		Tebal	1,23
	Permeabilitas	120		Permeabilitas	120
Yoke	Panjang	13,31	Yoke	Panjang	17,00
	Lebar	2,21		Lebar	2,20
	Tebal	0,51		Tebal	1,23
Leg	Panjang	6,71	Leg	Panjang	13,60
	Lebar	2,22		Lebar	1,50
	Tebal	0,51		Tebal	1,23
Lilitan primer	Bahan,	Tembaga	Lilitan primer	Bahan,	Tembaga
	Diameter kawat	0,05		Diameter kawat	0,2
	Jari-jari luar	3,35		Jari-jari luar	7,0
	Jari-jari dalam	2,6		Jari-jari dalam	5,6
	Tinggi	5,5		Tinggi	8,5
	Jumlah lilitan	1250		Jumlah lilitan	297

Pada Gambar 7 diperlihatkan hubungan antara  $V_s$  dan  $I_s$  dari rangkaian *SFCL* untuk *ring2* dengan rapat arus kritis  $I_c$  sebesar 3,52 A yang diukur pada suhu nitrogen cair. Pada rangkaian tersebut diberikan beban sebesar 250 W. Tampak pada Gambar 7 ada dua garis fitting yang saling berpotongan. Ini berarti bahwa gradien kedua garis tersebut berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi perubahan impedansi total  $Z$  yang diukur pada rangkaian tersebut. Ordinat titik perpotongan kedua garis tersebut disebut batas arus gagal  $I_p$ .



Gambar 7. Hubungan  $V_s$  dan  $I_s$  pada SFCL semi prototipe dengan sebuah ring2 beban  $R_L = 250 \text{ W}$

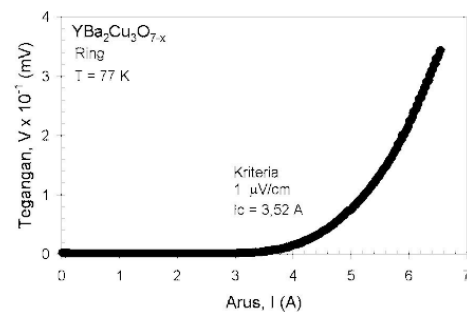
Tampak pada Gambar 7 bahwa kurva  $I_s(V_s)$  terdiri dari 2 segmen garis, yakni daerah sebelum fault (SBF) dan daerah sesudah fault (SSF) yang masing-masing menggambarkan kondisi SFCL sebagai fungsi tegangan sumber  $V_s$ . Segmen SBF adalah kondisi SFCL dalam keadaan normal, artinya SFCL tidak membebani rangkaian uji. Fitting dengan Microsoft Excel pada garis SBF diperoleh persamaan linear  $I_s = 0,004 V_s$  dengan koefisien arah persamaan tersebut adalah. Oleh karena itu impedansi total rangkaian uji adalah  $Z = 250 \text{ W}$ . Dari hubungan  $Z \gg R_L + Z_t$ , dimana  $250 \text{ W}$ , maka didapat impedansi SFCL, yakni  $Z_t \gg Z_t - R_L = 0$ .

Jadi terbukti bahwa pada keadaan normal, SFCL tidak membebani rangkaian uji. Segmen SSF menggambarkan SFCL dalam keadaan membebani rangkaian uji. Fitting dengan Microsoft Excel pada segmen SSF diperoleh persamaan linear :  $I_s = 0,0035 V_s + 0,0138$ . Koefisien arah persamaan tersebut adalah. Jadi, impedansi total rangkaian uji adalah  $Z_t = 286 \text{ W}$ . Dari hubungan  $Z_t \gg R_L + Z_t$ , dimana  $R_L = 250 \text{ W}$ , maka didapat impedansi SFCL, yakni  $Z_t \gg Z_t - R_L = 36 \text{ W}$ . Hal ini menunjukkan pada rangkaian SFCL tersebut telah terjadi penambahan beban sebesar  $36 \text{ W}$  [10]. Transisi SFCL dari keadaan normal ke keadaan terbebani, terjadi pada arus  $I_s \gg 110 \text{ mA}$ . Dengan kata lain, arus gagal yang dapat dibatasi oleh SFCL ini adalah  $I_F \gg 110 \text{ mA}$ .

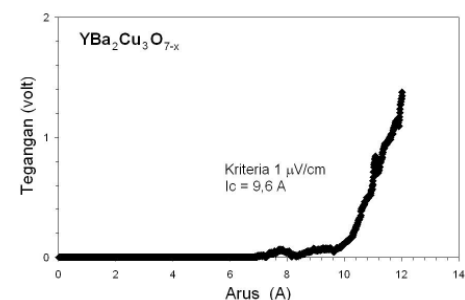
Pada SFCL skala laboratorium [5,6] diperoleh batas arus gagal  $I_F$  sekitar  $26 \text{ mA}$ , dan pada SFCL semiprototipe [10] diperoleh batas arus gagal  $I_F$  sekitar  $110 \text{ mA}$ . Jadi tampak adanya peningkatan batas arus gagal lima ratus persen lebih tinggi (satu orde lebih tinggi). Hasil ini sesuai dengan teori pada persamaan (6) dan sesuai pula dengan hasil simulasi ANSYS seperti pada Gambar 4, Gambar 5, dan Tabel 1. Berdasarkan hasil simulasi untuk SFCL semiprototipe diperoleh  $I_F$  sebesar  $120 \text{ mA}$ . Perbedaan ini disebabkan oleh faktor induktansi bocor akibat adanya rongga antara inti besi dengan ring. Jadi faktor penyebab meningkatnya arus gagal adalah akibat meningkatnya dimensi trafo SFCL ( $G_t$ ) dan berkurangnya jumlah lilitan primer ( $N_p$ ) dari 1250 lilitan menjadi 297. Pengurangan jumlah lilitan primer ( $N_p$ ) ini dilakukan dengan cara memperbesar diameter kawat tembaga (Cu) dari  $0,5 \text{ mm}$  menjadi  $2 \text{ mm}$  sehingga diharapkan arus yang mengalir pada lilitan primer semakin besar. Pada dasarnya tujuan pembesaran

dimensi trafo dan pengurangan jumlah lilitan primer ini adalah untuk memperoleh medan magnet induksi di dalam inti besi sekecil mungkin dengan masukan arus primer sebesar mungkin. Sehingga arus induksi yang dibangkitkan pada ring cukup kecil, sedemikian sehingga arus induksi  $I_i$  lebih kecil dari arus kritis  $I_c$  ring ( $I_i < I_c$ ). Dengan demikian superkonduktivitas ring tetap terjaga walaupun arus masukan pada lilitan primer cukup besar. Dengan kata lain arus induksi tersebut tidak merusak superkonduktivitas ring. Apabila arus induksi  $I_i$  lebih besar dari pada arus kritis  $I_c$ , maka superkonduktivitas ring hilang. Oleh karena itu ring berubah sifat menjadi resistif, akibatnya fluks magnetik pada teras besi tidak terhapuskan sehingga impedansi trafo  $Z_t \neq 0$ . Disinilah letak fenomena arus gagal mulai terjadi.

Gambar 8 dan Gambar 9 adalah kurva hubungan antara tegangan dan arus. Tampak tegangan tetap nol, walaupun arus dinaikkan. Namun demikian, jika arus terus diperbesar maka akan dijumpai suatu harga arus tertentu dimana tegangan mulai terdeteksi ( $V \neq 0$ ). Keadaan kritis ini menunjukkan adanya perubahan perilaku bahan yang semula bahan tersebut memiliki resistansi nol (superconductive state) berubah menjadi non superkonduksi (resistive state). Arus pada mana tegangan mulai terdeteksi ( $V \neq 0$ ) disebut arus kritis  $I_c$ .



Gambar 8. Kurva V – I dari ring1 [5].



Gambar 9. Kurva V-I dari ring2.

Pada Gambar 8 ditunjukkan bahwa arus kritis ( $I_c$ ) ring2 tampak jauh lebih tinggi dibandingkan dengan  $I_c$  ring1 (Gambar 9). Hal ini disebabkan prekursor serbuk ring2 lebih halus dibandingkan dengan ring1. Penghalusan serbuk ini bertujuan untuk memperbesar luas permukaan kontak antar butir, sehingga dapat mengurangi void dan mempermudah proses difusi pada saat sintering. Dengan penghalusan ini diperoleh dua manfaat, yakni meningkatkan rapat arus kritis bahan dan

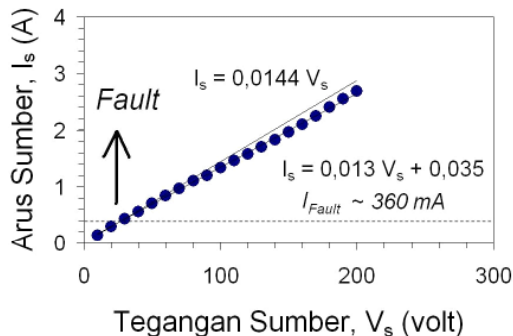
mempermudah proses pembuatan *ring*. Sebab dengan menggunakan teknik kompaksi, semakin besar dimensi *ring* kecenderungan untuk retak dan patah semakin tinggi.

Faktor lain yang dapat yang mempengaruhi peningkatan arus gagal ini adalah arus kritis  $I_c$ . Pada Gambar 10 diperlihatkan hasil pengukuran  $V_s$  dan  $I_s$  dari rangkaian SFCL untuk *ring2* dengan arus kritis  $I_c = 9,6 A$  yang diukur pada suhu nitrogen cair. Pada rangkaian tersebut diberikan beban sebesar 70 W, 201 W, dan 312 W. Data perubahan impedansi total  $Z$  pada rangkaian ini ditunjukkan pada Tabel 5 [16].

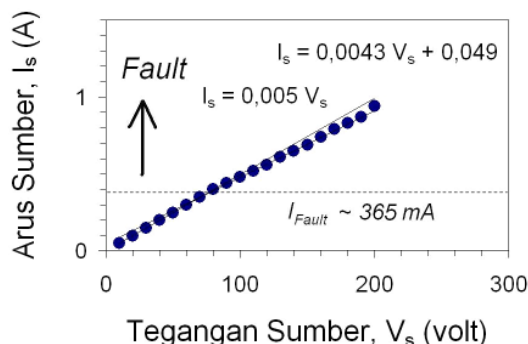
Tabel 5. Data impedansi  $Z$  pada SFCL dengan 1 buah ring2 ( $I_c = 9,6 A$ ).

Beban ( $\Omega$ )	Kondisi sebelum <i>fault</i>		Kondisi sesudah <i>fault</i>	
	Fitting	$Z(\Omega)$	Fitting	$Z(\Omega)$
70	$I_s = 0,0144 V_s$	69,4	$I_s = 0,013 V_s + 0,035$	76,9
201	$I_s = 0,005 V_s$	200,0	$I_s = 0,0043 V_s + 0,049$	232,6
312	$I_s = 0,0032 V_s$	312,5	$I_s = 0,0027 V_s + 0,0527$	370,4

Gambar 10, Gambar 11 dan Gambar 12 menunjukkan bahwa batas arus gagal  $I_F$  meningkat menjadi sekitar 360 hingga 365 mA dari harga semula  $I_F \gg 110 mA$ . Hasil ini sesuai dengan teori pada persamaan (6), bahwa salah satu faktor untuk meningkatkan arus gagal adalah dengan meningkatkan rapat arus kritis bahan superkonduktor ( $I_c$ ). Dengan  $I_c$  besar maka kemampuan *ring* untuk mempertahankan superkonduktifitasnya juga besar. Pada Gambar 10,

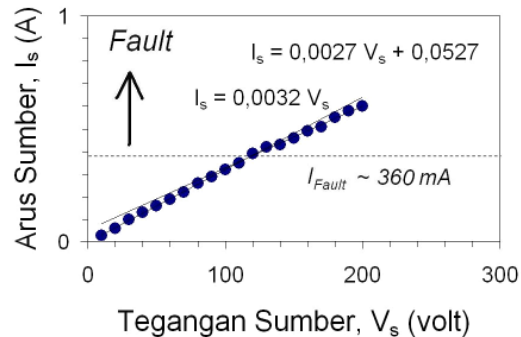


Gambar 10. Hubungan  $V_s$  dan  $I_s$  pada SFCL semiprototipe dengan 1 buah ring2 dan beban  $R_L = 70 W$ .



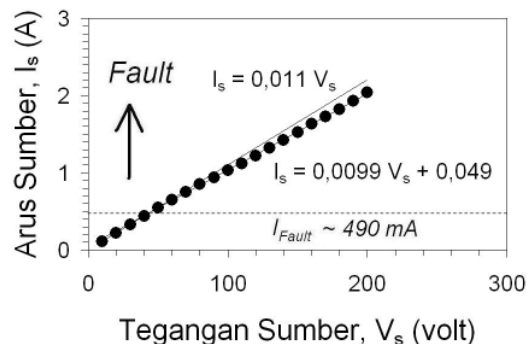
Gambar 11. Hubungan  $V_s$  dan  $I_s$  pada SFCL semiprototipe dengan 1 buah ring2 dan beban  $R_L = 201 W$ .

Gambar 11 dan Gambar 12 ditunjukkan bahwa variasi beban tidak mempengaruhi arus gagal. Hal ini berarti bahwa SFCL ini dapat digunakan pada rangkaian-rangkaian dengan beban bervariasi.



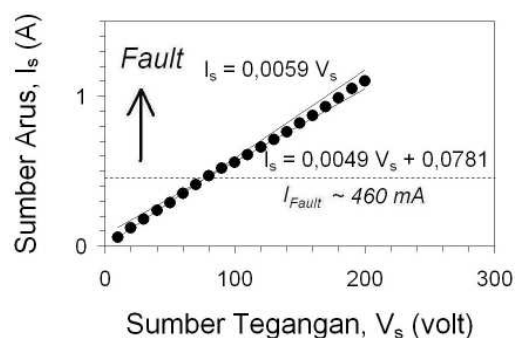
Gambar 12. Hubungan  $V_s$  dan  $I_s$  pada SFCL semiprototipe dengan 1 buah ring2 dan beban  $R_L = 312 W$ .

Pada Gambar 13 diperlihatkan hubungan antara  $V_s$  dan  $I_s$  dari SFCL yang memiliki dua buah *ring2* dengan rapat arus kritis  $I_c = 9,6 A$  dan diukur pada suhu nitrogen cair. Rangkaian SFCL tersebut diberi beban  $R_L = 91 W$ , 170 W, dan 312 W. Data perubahan impedansi total  $Z$  pada rangkaian ini ditunjukkan pada Tabel 6 [14].

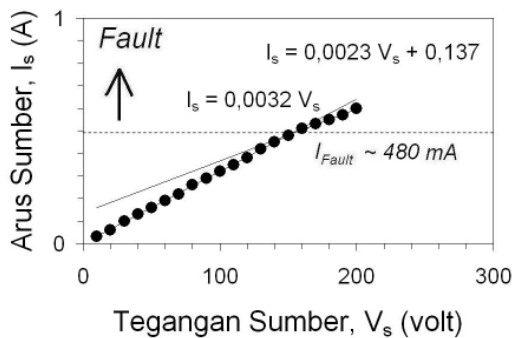


Gambar 13. Hubungan  $V_s$  dan  $I_s$  pada SFCL semiprototipe dengan 2 buah ring2 dan beban  $R_L = 91 W$ .

Pada Gambar 13, Gambar 14 dan Gambar 15 ditunjukkan bahwa batas arus gagal  $I_F$  meningkat menjadi sekitar 460 hingga 490 mA, dari harga semula  $I_F \gg 360 - 365 mA$ . Hasil ini sesuai dengan teori pada persamaan (6), bahwa salah satu faktor untuk meningkatkan arus gagal adalah dengan menambah



Gambar 14. Hubungan  $V_s$  dan  $I_s$  pada SFCL semiprototipe dengan 1 buah ring2 dan beban  $R_L = 170 W$ .



Gambar 15. Hubungan  $V_s$  dan  $I_s$  pada SFCL semiprototipe dengan 2 buah ring2 dan beban  $R_L = 312 \text{ W}$ .

Tabel 6. Data impedansi Z dari SFCL dengan 2 buah ring2 ( $I_c = 9,6 \text{ A}$ ).

Beban ( $\Omega$ )	Kondisi sebelum fault		Kondisi sesudah fault	
	Fitting	Z ( $\Omega$ )	Fitting	Z ( $\Omega$ )
91	$I_s = 0,011 V_s$	90,9	$I_s = 0,0099 V_s + 0,049$	101,0
170	$I_s = 0,0059 V_s$	169,5	$I_s = 0,0049 V_s + 0,0781$	204,1
312	$I_s = 0,0032 V_s$	312,5	$I_s = 0,0023 V_s + 0,137$	434,8

jumlah ring  $N_r$ . Dengan bertambahnya jumlah ring, maka medan magnet yang dibangkitkan oleh arus induksi pada ring meningkat. Sehingga fluks magnetik yang dibangkitkan oleh ring juga meningkat. Akibatnya fluks magnetik baik yang dibangkitkan oleh lilitan primer maupun oleh ring, juga meningkat. Itu berarti bahwa kemampuan pembatasan arus gagal meningkat. Di dalam SFCL, kedua fluks magnetik tersebut saling menhilangkan.

## KESIMPULAN

Penelitian dan pengembangan Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) di Pustek Bahan Industri Nuklir, BATAN telah sampai pada tahap semiprototipe. Arus gagal (fault current) pada SFCL dapat ditingkatkan dengan memperbesar dimensi trafo, meninggikan arus kritis, dan menambah jumlah ring. Jadi ada tiga faktor penting untuk meningkatkan batas arus gagal. Ketiga faktor tersebut ketika diterapkan pada SFCL semiprototipe, dapat meningkatkan arus gagal hingga 20 kali lebih tinggi dibandingkan dengan arus gagal pada SFCL skala laboratorium. Namun arus gagal SFCL semiprototipe ini masih relatif rendah dibandingkan dengan arus gagal SFCL yang dihasilkan oleh Zannella dan Cave. Penyebab utamanya adalah rendahnya rapat arus kritis  $J_c$  ring superkonduktor yang dihasilkan, yaitu sekitar  $90 \text{ A.cm}^{-2}$  hingga  $100 \text{ A.cm}^{-2}$ , sedangkan Zannella dan Cave memiliki  $J_c$  sekitar  $500 \text{ A.cm}^{-2}$  hingga  $800 \text{ A.cm}^{-2}$ .

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kepala Pustek Bahan Industri Nuklir, Kepala Bidang

Karakterisasi dan Analisis Nuklir, Riswal H. Siregar, S.Si. staf dari PRPN, dan semua pihak yang turut berpartisipasi dalam penelitian ini.

## DAFTARACUAN

- [1]. MATSUMURA, T., SHIMIZU, H., YOKOMIZU Y., *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, **11** (1) (2001) 1956-1963
- [2]. NAGATA, M., TANAKA, K., TANIGUCHI H., *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, **11** (1) (2001) 2489-2494
- [3]. SATOH, T., YAMAGUCHI, M., FUKUI, S., MORIKOSHI, K., KAIHO, K., SHIMIZU, H., MURAYAMA N., *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, **11** (1) (2001) 2398-2405
- [4]. YEW, W., EVANS, P. D., *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, **11** (1) (2001) 2495-2498
- [5]. ENKIR SUKIRMAN, WISNU ARIADI, DIDIN S. WINATAPURA, RISWAL H. SIREGAR, Pembuatan dan Karakterisasi Superconducting Fault Current Limiter Skala Laboratorium, *Prosiding Seminar Nasional Penelitian Pengelolaan Perangkat Nuklir (P3N)*, Yogyakarta, 23-24 Oktober (2003) 63-67
- [6]. WISNU ARIADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA, YUSTINUS P., Pengaruh Medan Magnet Induksi terhadap Pembatasan Arus pada Superconducting Fault Current Limiter Skala Laboratorium, *Prosiding Pertemuan Ilmiah Iptek Bahan '04*, 7 September (2004) 411-418
- [7]. SMYTHE, WR., *Static and Dinamic Electricity*, McGraw-Hill, New York, (1950) 266
- [8]. E. SUKIRMAN, WISNU ARI ADI, DIDIN S. WINATAPURA dan YUSTINUS P., *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **7** (1) (2005)
- [9]. ENKIR SUKIRMAN, WISNU ARIADI, DIDIN S. WINATAPURA dan YUSTINUS P., Optimalisasi SFCL semiprototipe, sedang dalam proses penerbitan di *Jurnal Sains Materi Indonesia*, (2005)
- [10]. ZANNELLA, S., JANSACK, L. and DODANIO, P., *Cryogenics*, **37** (1997) 667-670
- [11]. CAVE, J.R., WILLEN, W.A., BRISSETTE, Y., RICHER, C., *IEEE Transactions On Magnetics*, **30** (4) (1994) 1895-1898
- [12]. MOAVENI, S., *Finite Element Analysis, Theory and Application with ANSYS*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, (1999)
- [13]. WISNU ARIADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA dan YUSTINUS P., *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **5** (2) (2004)
- [14]. AKMAL JOHAN, RIDWAN, AZWAR MANAF dan WISNU ARI ADI, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **7** (1) (2005)

- [15]. WISNU ARIADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA dan GRACE TJ. SULUNGBUDI, *Majalah BATAN*, **XXXIV** (1/2) (2001) 15-30
- [16]. WISNU ARIADI, ENKIR SUKIRMAN, DIDIN S. WINATAPURA, YUSTINUS M. P. dan RISWAL H. SIREGAR, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **5** (3) (2004)