

# Analisis Karakteristik Arus Inrush pada Transformator 3 Fasa dengan Leg yang Berbeda Berbasis Eksperimen

Arief Budi Ksatria<sup>1</sup>, Aditya Wahyu Ramadhan<sup>2</sup>

Departemen Teknik Elektro, ELECTICS, Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Kampus Sukolilo, Surabaya 60118  
E-mail: arief.ksatria15@mhs.ee.its.ac.id<sup>1</sup>

## ABSTRAK

Fenomena arus inrush merupakan kondisi transformator pada saat pertama kali dihubungkan dengan sumber tegangan dan menghasilkan lonjakan arus yang tinggi. Arus inrush dapat menyebabkan gangguan dan akan mempengaruhi kinerja dan sistem proteksi pada transformator. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui karakteristik arus inrush pada transformator tiga fasa dengan besar leg yang berbeda sehingga dapat diketahui pula pengaruh perbedaan besar leg dengan arus inrush yang dihasilkan. Pada studi ini dilakukan pengujian dengan mengambil data arus inrush pada transformator uji 3 fasa 5 kVA tipe inti core konvensional, dengan metode pengukuran berbasis eksperimen. Pengujian pada transformator dilakukan pada saat kondisi transien, yaitu saat transformator melakukan energizing. Pengujian ini dilakukan dengan cara menguji setiap fasa secara bergantian dan menguji ketiga fasa secara bersamaan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa fasa S yang memiliki leg paling besar diantara kedua fasa lainnya, menghasilkan arus inrush dan arus no load yang paling tinggi dibandingkan kedua fasa lainnya. Selain itu, pada fasa S menunjukkan kurva magnetisasi inti transformator pada area non-saturasi. Hal ini mempengaruhi karakteristik arus yang dihasilkan transformator

**Kata Kunci:** Arus Inrush, Eksperimen, Transformator 3-Fasa, Leg Berbeda.

## 1.1 PENDAHULUAN

Transformator berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan level tegangan antara dua rangkaian [1]. Prinsip kerja transformator berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator merupakan salah satu peralatan dalam sistem tenaga listrik yang memiliki peran sangat penting, yaitu untuk menaikkan tegangan dari pembangkit yang disalurkan pada sistem transmisi dan untuk menurunkan tegangan dari sistem transmisi untuk kemudian didistribusikan ke beban-beban seperti industri, perkantoran, maupun rumah tangga [2].

Keandalan transformator harus diperhatikan karena semakin handal sebuah transformator maka akan semakin baik kualitas daya yang dihasilkan sehingga tidak ada kerugian pada pihak konsumen maupun pihak produsen listrik. Oleh karena itu, sistem proteksi yang baik pada transformator sangat diperlukan. Fenomena-fenomena tertentu dapat muncul dalam transformator yang dapat menyebabkan gangguan dan akan mempengaruhi kinerja dan

sistem pengamanan pada transformator sehingga akan mempengaruhi pula performa transformator tersebut. Salah satu fenomena tersebut adalah arus inrush. Saturasi inti magnet dari transformator adalah penyebab utama terjadinya arus inrush [3]. Saturasi tersebut terjadi karena perubahan secara tiba-tiba dalam sistem tegangan yang mungkin disebabkan oleh switching transient, sinkronisasi fasa generator, kesalahan eksternal, dan restorasi kesalahan [3]. Dengan adanya fenomena arus inrush ini kondisi transformator saat pertama kali dihubungkan dengan sumber tegangan, arus magnetisasi dapat mencapai 10-20 kali dari arus rating, sedangkan pada saat kondisi steady state arus magnetisasi pada transformator hanya 1-2% dari arus rating [4].

Tidak ada bukti langsung bahwa pengisian daya (energize) pada transformator dapat menyebabkan kegagalan langsung karena arus inrush yang tinggi. Namun, kegagalan isolasi dalam transformator daya yang sering melewati proses pengisian daya (energize) pada keadaan

tidak berbeban mendukung dugaan bahwa arus inrush memiliki efek yang cukup berbahaya [5]. Arus inrush dapat menyebabkan kesalahan operasi rele proteksi pada transformator, mengurangi usia operasi transformator, dan mengurangi kualitas daya pada sistem [6]. Besarnya arus inrush juga dapat dipengaruhi oleh variasi sudut penyalan dan fluks sisa di dalam inti transformator [7]. Fluks sisa merupakan fenomena yang sulit untuk dihindari. Belum diketahui berapa lama waktu yang dibutuhkan fluks sisa tersebut untuk menghilang dari inti transformator karena fluks sisa akan muncul saat proses pengisian daya (energize).

Fenomena arus inrush transformator satu fasa maupun tiga fasa telah dibahas dalam beberapa literatur [4]–[10]. Berbagai macam metode, baik eksperimen maupun simulasi telah dilakukan untuk mendapatkan karakteristik arus inrush pada transformator. Parameter yang sering digunakan diantaranya adalah jenis material inti transformator, cara pemotongan inti transformator, dan besarnya fluks sisa pada inti transformator. Dengan diketahuinya karakteristik arus inrush maka dapat dilakukan penanganan yang tepat agar tidak terjadi kegagalan pada transformator sehingga keandalan sistem tenaga listrik tetap terjaga dengan baik. Permasalahan dalam studi ini adalah pengaruh perbedaan besar leg terhadap karakteristik arus inrush pada transformator tiga fasa 5KVA berdasarkan metode pengukuran berbasis eksperimen

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Transformator Tidak Ideal

Transformator dikatakan tidak ideal disebabkan oleh beberapa hal diantaranya adalah pengaruh resistansi kumparan, pengaruh adanya fluks bocor, dan arus eksitasi karena permeabilitas inti yang terbatas. Efisiensi dari transformator tidak ideal adalah kurang dari 100%. Tidak semua fluks yang dihasilkan oleh kumparan primer mengalir melalui kumparan sekunder. Ada sebagian fluks yang tidak mengalir pada suatu kumparan, melainkan mengalir bebas ke udara. Hal ini yang dinamakan sebagai fluks bocor. Selain itu, rugi inti juga menyebabkan transformator tidak ideal, hal ini dipengaruhi oleh resistansi inti dan reaktansi magnetic yang terjadi pada inti transformator. Permeabilitas inti yang terbatas

mempengaruhi arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan gaya gerak magnet untuk mempertahankan fluks yang dibutuhkan transformator agar beroperasi dengan baik.

### 2.2 Transformator Tiga Fasa Satu Inti

Sebagian besar sistem kelistrikan, mulai dari sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi menggunakan transformator tiga fasa. Transformator tiga fasa dapat dibuat dengan cara menghubungkan tiga unit transformator satu fasa atau dengan cara membuat satu unit transformator yang terdiri dari tiga pasang belitan yang digulung mengelilingi tiga lengan pada satu inti. Pada umumnya terdapat tiga cara untuk merangkai belitan di sisi primer dan sekunder, yaitu hubungan bintang (Wye), hubungan delta dan hubungan zig – zag. Oleh karena itu, transformator tiga fasa dapat dihubungkan dengan beberapa kombinasi. Antara lain hubungan Wye – Wye, hubungan Wye – Delta, hubungan Delta – Wye, dan hubungan Delta – Delta. Pada sistem tiga fasa seimbang, perbedaan fasa untuk setiap belitannya sebesar  $120^\circ$ , sedangkan perbedaan fasa antara hubungan Wye dan Delta sebesar  $30^\circ$ .

### 2.3 Histerisis pada Transformator

Histerisis merupakan rugi-rugi pada transformator yang disebabkan oleh adanya fluks magnetik yang tersisa di dalam inti besi yang dikarenakan adanya perubahan kenaikan maupun penurunan nilai magnetisasi. Besarnya histerisis dipengaruhi oleh jenis bahan inti yang digunakan. Oleh karena itu pemilihan bahan inti transformator juga harus diperhatikan untuk menghindari rugi histerisis yang besar. Kurva histerisis menunjukkan perbandingan kerapatan fluks (B) dengan intensitas medan magnet (H). Kerapatan fluks adalah jumlah aliran fluks per luas lintasan.

Saat transformator di hubungkan dengan tegangan dan mencapai kondisi saturasi pada inti, kemudian transformator dimatikan, maka akan selalu terdapat fluks sisa pada inti. Hal ini dipengaruhi oleh reventivitas. Reventivitas adalah kemampuan dari material dalam mempertahankan sebagian magnet yang mengalir pada inti setelah proses magnetisasi berhenti.

### 2.4 Audit Energi Rinci

Inrush merupakan fenomena transien yang terjadi pada peralatan yang menggunakan prinsip elektromagnetik, seperti transformator saat dilakukan proses energize pada kondisi tanpa

beban. Besar arus inrush bisa mencapai 10-20 kali besar arus ratingnya [4]. Saturasi inti magnetik dari transformator adalah salah satu penyebab utama terjadinya fenomena transien ini. Saturasi pada inti terjadi karena adanya perubahan secara tiba-tiba pada sistem tegangan akibat switching transient, sinkronisasi fasa generator, kesalahan eksternal, dan restorasi kesalahan [3]. Arus inrush terdiri dari dua bagian, antara lain arus magnetisasi dan arus rugi inti [11]. Arus magnetisasi merupakan arus yang diperlukan untuk menghasilkan fluks pada inti transformator, sedangkan arus rugi inti merupakan arus yang diperlukan untuk rugi histerisis dan rugi arus eddy dapat terjadi.

Arus inrush pada transformator bisa terjadi ketika fluks sisa di dalam inti tidak memenuhi nilai sesaat fluks dalam kondisi steady-state, terutama pada titik-titik gelombang tegangan tertentu. Laju perubahan fluks sesaat pada inti transformator mempunyai nilai yang sebanding dengan jatuh tegangan sesaat pada belitan yang terhubung pada sumber. Ketika transformator dioperasikan secara terus-menerus, nilai fluks puncak akan berada pada nilai negatif saat tegangan berada pada titik nol. Kondisi idealnya adalah ketika transformator di-energize, nilai fluks harus bermula pada titik nol. Sehingga saat menaikkan tegangan dari nol nilai fluks akan mencapai nilai puncak yang berkali-kali lipat dari kondisi idealnya. Ketidaklinieran karakteristik kurva magnetisasi pada kondisi saturasi akan mengakibatkan jumlah gaya gerak magnet yang tidak sebanding diperlukan untuk membangkitkan fluks magnet, sehingga arus belitan yang diperlukan untuk membuat gaya gerak magnet akan meningkat untuk menghasilkan fluks pada inti transformator dibandingkan saat kondisi normal. Nilai puncak arus inrush adalah sebuah fungsi yang terdiri atas tegangan suplai, kerapatan medan magnet sisa, dan kerapatan medan magnet saturasi, resistansi kumparan primer dan induktansi transformator. Nilai puncak arus inrush dapat diperoleh berdasarkan parameter-parameter transformator pada saat kondisi beroperasi seperti yang ditunjukkan pada studi [12]. Seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (1).

Besar nilai kerapatan medan magnet normal diperoleh pada saat transformator beroperasi normal. Kerapatan medan magnet sisa ( $B_R$ ) dan kerapatan medan magnet jenuh ( $B_S$ ) diperoleh

berdasarkan nilai permeabilitas dari inti transformator. Oleh karena itu, jenis material inti transformator berpengaruh terhadap besarnya arus *inrush*, sehingga dengan jenis material inti yang berbeda besar arus *inrush* dimungkinkan berbeda pula [13]. Selain itu, kedua parameter tersebut juga didasarkan pada kurva magnetisasi dari transformator, khususnya untuk mencari nilai  $B_R$  yang tampak pada saat intensitas medan bernilai nol. Semakin tinggi nilai magnetisasi (saturasi), maka semakin tinggi pula arus yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan persamaan (1).

$$i_{peak} = \frac{\sqrt{2}V_m}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \left( \frac{2.B_N + B_R + B_S}{B_N} \right) \quad (1)$$

Keterangan :

$V_m$  = Tegangan maksimal (V)

$L$  = Induktansi (H)

$R$  = Resistansi total (Ohm)

$B_N$  = Kerapatan medan magnet normal (T)

$B_R$  = Kerapatan medan magnet sisa (T)

$B_S$  = Kerapatan medan magnet jenuh (T)

$$I_m = I_p \sin \theta \quad (2)$$

$$\lambda = (I_m \times V_p) / (I_p \times 2\pi f) \quad (3)$$

Keterangan :

$I_m$  = Arus magnetisasi (A)

$I_p$  = Arus pada sisi primer transformator (A)

$V_p$  = Tegangan pada sisi primer transformator (V)

$\lambda$  = Flux linkage (Wb – T)

### 3. METODE PENELITIAN

#### 3.1 Spesifikasi Transformator Uji

Transformator yang diuji merupakan transformator tiga fasa dengan kapasitas daya 5 kVA yang memiliki perbedaan besar *leg*, dimana *leg* pada fasa R dan T memiliki besar yang sama, sedangkan *leg* pada fasa S berukuran lebih besar daripada kedua fasa lainnya. Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1.

#### 3.2 Pengukuran Arus *Inrush*

Proses pengukuran arus inrush terdiri dari tahap pengukuran dan tahap demagnetisasi. Tahap pengukuran dilakukan untuk mengetahui nilai dan bentuk arus inrush. Tahap demagnetisasi dilakukan setelah tahap pengukuran. Seperti yang telah diketahui bahwa fluks sisa pada inti transformator mempengaruhi tinggi rendahnya nilai arus inrush, sehingga untuk memperoleh nilai arus inrush yang sesuai dengan kondisi awal transformator saat di-energize pertama kali, maka proses demagnetisasi perlu dilakukan untuk mengurangi fluks sisa pada inti transformator. Hal ini dilakukan agar kondisi fluks dalam transformator bernilai konstan setiap eksperimen pengukuran arus *inrush* sehingga

didapatkan hasil yang lebih akurat. Tahap demagnetisasi menggunakan kapasitor. Alat yang digunakan untuk pengukuran arus *inrush* yang berbasis pada laboratorium menggunakan rangkaian yang ditunjukkan pada Gambar 2.

### 3.3 Proses Demagnetisasi

Proses demagnetisasi pada transformator merupakan proses yang dibutuhkan untuk mengurangi fluks sisa pada inti transformator sehingga nilai arus *inrush* akan berkurang. Seperti yang sebelumnya telah dijelaskan bahwa setiap kali dilakukan energize pada transformator maka akan timbul arus magnetisasi yang selanjutnya digunakan untuk menghasilkan fluks pada inti

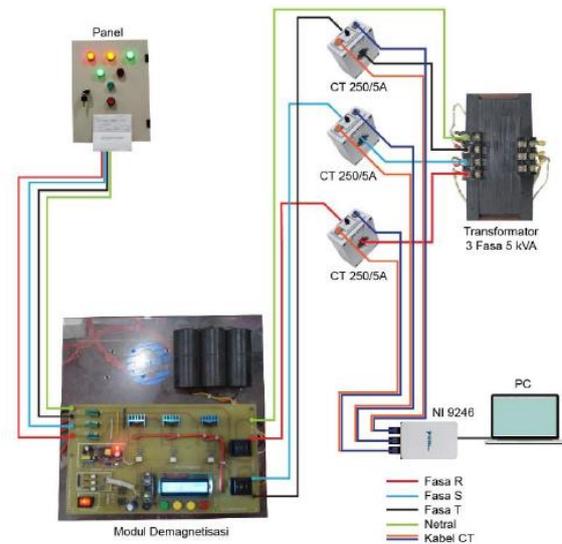
Ada beberapa metode demagnetisasi pada bahan magnetik diantaranya adalah sebagai berikut.

- 1) Demagnetisasi melalui vibrasi
- 2) Demagnetisasi dengan pemanasan hingga suhu curie
- 3) Demagnetisasi elektrik

Pada transformator hanya bisa digunakan metode demagnetisasi elektrik yaitu dengan cara menggunakan input sumber DC dan menggunakan kapasitor. Dalam studi ini digunakan demagnetisasi menggunakan kapasitor shunt. Kapasitor shunt sebanyak tiga buah kapasitor dengan kapasitas 40uF. Dipasang secara paralel terhadap sistem yang dikendalikan oleh saklar manual.



Gambar 1. Transformator uji 5 kVA.



Gambar 2. Rangkaian pengukuran arus *inrush* dan demagnetisasi transformator.

Saklar diaktifkan ketika sistem dalam kondisi mati setelah proses pengukuran arus *inrush* pada transformator. Saklar dinyalakan dalam waktu tertentu untuk proses demagnetisasi transformator uji. Tujuan dari proses demagnetisasi pada studi ini adalah untuk mendapatkan kondisi fluks pada inti transformator dengan jumlah yang sama pada setiap pengukuran yang dilakukan sehingga besar arus *inrush* yang didapatkan lebih akurat.

## 4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

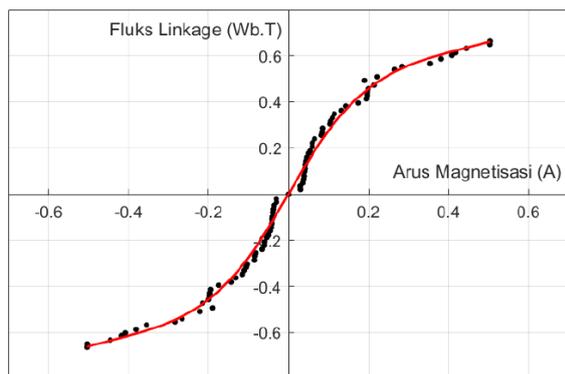
### 4.1 Pengujian Kurva Magnetisasi Inti

Karakteristik arus *inrush* pada transformator dapat dilihat pada kurva magnetisasi inti transformator tersebut. Kurva magnetisasi inti menggambarkan hubungan antara arus magnetisasi ( $I_m$ ) dengan *flux linkage* ( $\lambda$ ). Untuk mendapatkan nilai – nilai tersebut, maka dilakukan pengujian transformator tanpa beban (*open – circuit test*). Berdasarkan hasil pengujian yang didapatkan, arus magnetisasi dan *flux linkage* didapatkan dari persamaan (2) dan (3). Hasil pengujian transformator tanpa beban, nilai arus magnetisasi dan *flux linkage* ditunjukkan oleh Tabel 1. Sedangkan kurva magnetisasi pada fasa R, S, dan T ditunjukkan oleh Gambar 3, Gambar 4 dan Gambar 5.

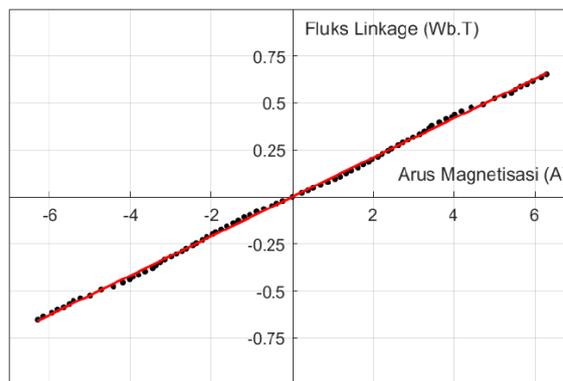
Tabel 1. Data Pengujian Tanpa Beban pada Fasa R

Voc (V)	Ioc (A)	Poc (W)	Qoc (VAR)	S (VA)
6.5	0.04	0.20	0.20	0.28
10.9	0.06	0.50	0.30	0.58
15.3	0.06	0.50	0.40	0.64
20.3	0.09	1.80	0.80	1.97
24.8	0.14	3.00	0.90	3.13
31	0.14	4.10	1.20	4.27

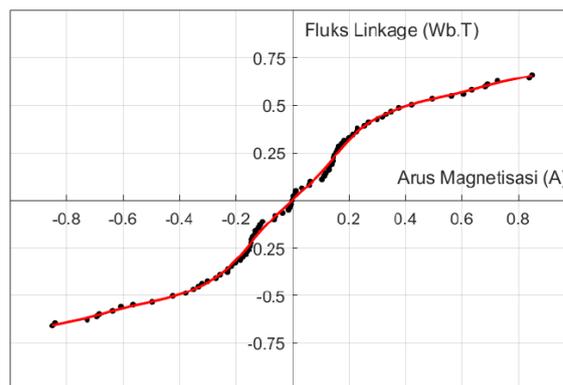
Voc (V)	Ioc (A)	Poc (W)	Qoc (VAR)	S (VA)
34.5	0.19	6.20	1.40	6.36
40.1	0.15	7.20	2.10	7.50
45	0.18	7.90	2.00	8.15
50	0.21	10.00	2.30	10.26
55.6	0.21	11.30	2.80	11.64
58.8	0.23	13.00	3.20	13.39
65	0.19	11.90	3.90	12.52
69.7	0.21	14.20	4.20	14.81
75.2	0.20	14.20	4.90	15.02
80.1	0.23	17.10	6.60	18.33
84.3	0.23	17.60	7.00	18.94
89.9	0.23	18.80	7.70	20.32
95.8	0.23	19.00	9.80	21.38
99.5	0.25	22.50	10.50	24.83
109.2	0.28	27.8	12.5	30.48
114	0.29	29.3	15.1	32.96
119.8	0.29	29.7	17	34.22
124	0.28	27.5	21.7	35.03
129.8	0.33	34	25.1	42.26
134.6	0.34	39.1	28.3	48.27
138.3	0.34	40.1	28.5	49.2
143.4	0.36	42.7	28.6	51.39
148.4	0.41	51.6	31.9	60.66
154.8	0.54	80	30	85.44
159.8	0.55	90	40	98.49
169.6	0.59	100	50	111.8
173.9	0.69	110	50	120.83
178	0.74	110	60	125.3
184.2	0.76	120	70	138.92
189	0.78	130	80	152.64
192.7	0.84	140	80	161.25
198.5	0.87	150	90	174.93
203.9	0.97	180	110	210.95
208.5	1.04	180	100	205.91
219.7	1.14	180	100	205.91



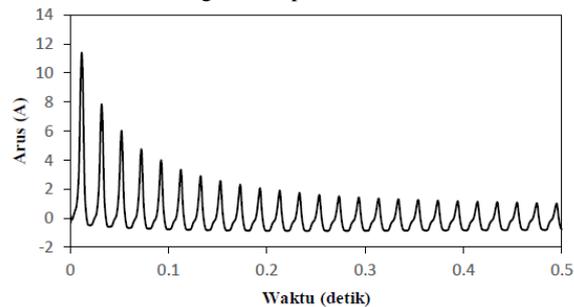
Gambar 3. Kurva Magnetisasi pada Fasa R.



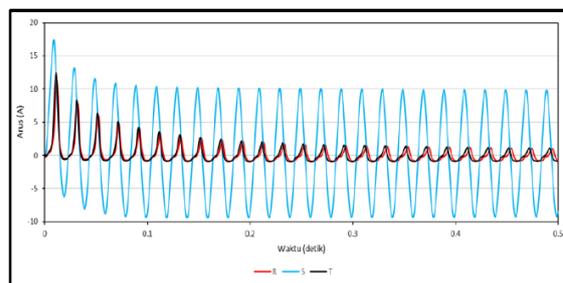
Gambar 4. Kurva Magnetisasi pada Fasa S



Gambar 5. Kurva Magnetisasi pada Fasa T



Gambar 6. Arus *inrush* pada fasa R.



Gambar 7. Perbandingan Arus *Inrush* Antar Fasa.

Tabel 2. Hasil Pengujian Arus *Inrush* pada Tegangan 220 V

Fasa	Arus <i>Inrush</i> Minimal (A)	Arus <i>Inrush</i> Maksimal (A)	Arus Rata – Rata (A)
R	8.13	11.41	9.84
S	14.34	17.44	15.95
T	8.18	12.45	9.74

#### 4.2 Pengujian Inrush Current

Pengujian dilakukan pada sudut penyalaan  $0^\circ$ . Pengujian dilakukan dengan cara memberikan sumber 220 V kepada masing – masing fasa pada transformator. Kemudian dilakukan akuisisi data arus *inrush*, pada masing – masing fasa tersebut. Bentuk gelombang dan besarnya arus *inrush* pada fasa R ditunjukkan oleh Gambar 6. Telah dilakukan 5 kali pengujian arus *inrush* pada masing – masing fasa. Pada fasa R, nilai arus *inrush* terbesar sebesar 11.41 A. Sedangkan untuk perbandingan arus *inrush* pada masing – masing fasa ditunjukkan oleh Gambar 7 dan Tabel 2. Berdasarkan tabel tersebut, dapat diketahui bahwa besarnya arus *inrush* pada fasa R dan T tidak berbeda jauh. Sedangkan pada fasa S, besarnya arus *inrush* memiliki selisih yang lebih besar. Jika pada fasa R dan T besarnya arus *inrush* sekitar 11 – 12 A, pada fasa S besarnya arus *inrush* sebesar 17.44 A. Gambar 7 menunjukkan bahwa arus *inrush* pada fasa S tidak mengalami lonjakan signifikan jika dibandingkan dengan arus tanpa bebannya. Arus *inrush* maksimalnya sebesar 17.44 A, sedangkan arus tanpa bebannya sebesar 9.51 A. Sehingga lonjakan arus yang terjadi sebesar 1.83 %. Sedangkan pada Fasa R dan T besarnya arus *inrush* sebesar 11.41 – 12.45 A, sedangkan arus tanpa bebannya sebesar 0.75 – 0.76 A. Sehingga lonjakan arus yang terjadi sebesar 15.21 – 16.45 %.

## 5. KESIMPULAN

1. Fasa S menghasilkan arus *inrush* yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan fasa R dan T. Hal ini disebabkan oleh adanya perbedaan *leg* pada transformator, dimana fasa S memiliki *leg* paling besar dibandingkan kedua fasa lainnya yang memiliki besar *leg* yang sama. Kondisi tersebut akan mempengaruhi jumlah fluks yang ada pada inti transformator. Fasa S memiliki luas yang lebih besar dibandingkan kedua fasa lainnya sehingga jumlah fluks yang dihasilkan lebih besar, maka nilai arus *inrush* dan arus *no – load* dari Fasa S ini sangatlah tinggi dibandingkan dengan kedua fasa lainnya.
2. Lonjakan arus *inrush* pada fasa S lebih rendah jika dibandingkan fasa yang lain. Hal tersebut disebabkan karena pada fasa S mempunyai titik saturasi yang sangat tinggi Sehingga pada fasa S lebih lama mencapai titik saturasi.

## DAFTAR PUSTAKA

[1] R. M. Del Vecchio, B. Poulin, P. T. Feghali, D. M. Shah, dan R. Ahuja, *Transformer Design Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers, Second Edition*. FL: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2010.

- [2] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals: Fourth Edition*. New York: McGraw-Hill Education, 2005.
- [3] N. Chiesa, *Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [4] P. C. Y. Ling dan A. Basak, "Investigation of magnetizing *inrush* current in a single-phase transformer," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, no. 6, hlm. 3217–3222, Nov 1988.
- [5] M. Steurer dan K. Frohlich, "The impact of *inrush* currents on the mechanical stress of high voltage power transformer coils," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 1, hlm. 155–160, Jan 2002.
- [6] R. Cano-González, A. Bachiller-Soler, J. A. Rosendo-Macias, dan G. Álvarez-Cordero, "Inrush current mitigation in three-phase transformers with isolated neutral," *Electric Power Systems Research*, vol. 121, hlm. 14–19, 2015.
- [7] J. C. Oliveira, C. E. Tavares, R. Apolonio, A. B. Vasconcellos, dan H. S. Bronzeado, "Transformer Controlled Switching to Eliminate *Inrush* Current - Part I: Theory and Laboratory Validation," dalam *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, 2006, hlm. 1–5.
- [8] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang, dan J. C. Yeh, "Investigation of magnetizing *inrush* current in transformers. I. Numerical simulation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, hlm. 246–254, Jan 1993.
- [9] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang, dan J. C. Yeh, "Investigation of magnetizing *inrush* current in transformers. II. Harmonic analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, hlm. 255–263, Jan 1993.
- [10] J. J. Rico, E. Acha, dan M. Madrigal, "The study of *inrush* current phenomenon using operational matrices," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, hlm. 231–237, Apr 2001.
- [11] R. Cahyadi Putra, "Eksperimen dan Simulasi Finite Element Method (FEM) Pengaruh Topologi Pemotongan Inti Transformator Tiga Fasa Pada Kurva Magnetisasi dan Arus *Inrush*," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.
- [12] M. Jamali, M. Mirzaie, dan S. Asghar Gholamian, "Calculation and Analysis of Transformer *Inrush* Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions," 2011.
- [13] I.M. Yulistya Negara, Dimas A. Asfani, Daniar Fahmi, Shandy Baskoro, dan Budi Arief K, "Materials and Cutting Method Effects of Three Phase Transformer Core on Magnetization Curve and *Inrush* Current: Simulation Approach," *International Review on Modelling and Simulations (IREMOS)*, vol. 8, 2015.