



TESIS - TE142599

**PENGARUH CARA POTONG INTI TERHADAP
INRUSH CURRENT PADA TRANSFORMATOR
SATU FASA 1-KVA DAN TIGA FASA 3-KVA**

ARIEF BUDI KSATRIA
07111550010205

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TESIS - TE142599

**PENGARUH CARA POTONG INTI TERHADAP
INRUSH CURRENT PADA TRANSFORMATOR
SATU FASA 1-KVA DAN TIGA FASA 3-KVA**

ARIEF BUDI KSATRIA
07111550010205

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN

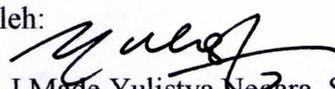
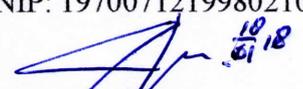
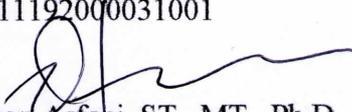
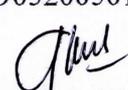
Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Arief Budi Ksatria
NRP. 07111550010205

Tanggal Ujian : 18 Desember 2017
Periode Wisuda: Maret 2018

Disetujui oleh:

- 
1. Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc (Pembimbing I)
NIP: 197007121998021001
- 
2. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D (Pembimbing II)
NIP: 197311192000031001
- 
3. Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D (Penguji)
NIP: 198109052005011002
- 
4. Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D (Penguji)
NIP: 198006032006041003
- 
5. Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc., Ph.D (Penguji)
NIP: 198208292006042001

Dekan Fakultas Teknologi Elektro




Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.
NIP. 197002121995121001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**PENGARUH CARA POTONG INTI TERHADAP *INRUSH CURRENT* PADA TRANSFORMATOR SATU FASA 1-KVA DAN TIGA FASA 3-KVA**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2018



Arief Budi Ksatria

07111550010205

Halaman ini sengaja dikosongkan

PENGARUH CARA POTONG INTI TERHADAP *INRUSH CURRENT* PADA TRANSFORMATOR SATU FASA 1-KVA DAN TIGA FASA 3-KVA

Nama mahasiswa : Arief Budi Ksatria
NRP : 07111550010205
Pembimbing : 1. Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
2. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

Pada studi ini dibahas mengenai pengaruh cara potong inti terhadap *inrush current* pada transformator satu fasa 1-kVA dan tiga fasa 3-kVA. Cara potong yang digunakan yaitu cara potong E-I dan E-E. Dilakukan pemodelan pada transformator satu fasa dan tiga fasa. Pemodelan tersebut didasarkan pada rangkaian ekuivalen. Nilai rugi-rugi inti besi juga diperhitungkan. Selain itu dilakukan simulasi berbasis *finite-element method* (FEM). Besarnya *inrush current* yang didapatkan dari simulasi berbasis rangkaian ekuivalen dibandingkan dengan hasil pengujian. Sedangkan simulasi berbasis FEM digunakan untuk mengetahui besarnya kerapatan fluks dan intensitas medan magnet pada transformer. Hasilnya menunjukkan bahwa besarnya *inrush current* dipengaruhi oleh rugi-rugi inti dan cara potong E-I memberikan nilai puncak *inrush current* yang lebih rendah.

Kata kunci: Cara Potong Inti, FEM, *inrush current*, Transformator

Halaman ini sengaja dikosongkan

CORE-CUTTING TOPOLOGY EFFECTS OF SINGLE PHASE 1-KVA AND THREE PHASE 3-KVA TRANSFORMER ON INRUSH CURRENT

By : Arief Budi Ksatria
Student Identity Number : 07111550010205
Supervisor(s) : 1. Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
2. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

ABSTRACT

This study deals with core-cutting topology effects of single phase 1-KVA and three phase 3-KVA transformer on its inrush current. Different core-cutting topologies of transformer which is E-I and E-E were studied. Finite-element method and equivalent circuit based simulation were done to understand its effect on inrush current of transformer. Equivalent circuit is used to obtain the peak value of inrush current. Meanwhile finite-element method simulation is used to understand the distribution of flux density and magnetic field intensity. The results show that inrush current value influenced by core losses. Moreover, it is shown that E-I cutting topology gives lower peak value of inrush current.

Key words: Core-Cutting Topology, Finite-Element Method (FEM), Inrush Current, Transformer

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya. Shalawat serta salam selalu tercurah kepada Nabi Besar Muhammad SAW, keluarga, dan sahabat serta kita semua selaku umatnya. Alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir **“Pengaruh Cara Potong Inti Terhadap *Inrush Current* Pada Transformator Satu Fasa 1-kVA dan Tiga Fasa 3-kVA”** ini tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak I Made Yulistya Negara dan Bapak Dedet Candra Riawan, atas segala pengetahuannya dan waktunya dalam membimbing penulis sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Kedua Orang tua dan calon istri penulis yang selalu memberikan nasehat, semangat, dan doa kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Keluarga Besar yang selalu memberikan semangat dan hiburan kepada penulis selama mengerjakan Tugas Akhir.
4. Pak Dimas Anton, Pak IGN Satriyadi, dan Pak Daniar Fahmi sebagai dosen-dosen laboratorium Teknik Tegangan Tinggi yang memberikan ilmu-ilmunya selama masa kuliah.
5. Seluruh dosen dan karyawan yang telah memberikan ilmu dan membantu saya menyelesaikan studi di Departemen Teknik Elektro ITS.
6. Seluruh teman-teman S2 yang selalu memberikan motivasi selama masa perkuliahan.
7. Seluruh asisten laboratorium Teknik Tegangan Tinggi yang selalu memberikan dukungan selama masa perkuliahan.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i>	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan	2
BAB 2 TRANSFORMATOR DAN FENOMENA INRUSH CURRENT.....	3
2.1 Definisi Transformator	3
2.2 Konstruksi.....	6
2.2.1 Tipe Inti.....	6
2.2.2 Dampak dari Proses Perakitan pada Kinerja Inti	7
2.3 Parameter – Parameter Transformator.....	8
2.3.1 <i>Output Power P_o versus Apparent Power P_t</i>	8
2.3.2 Geometris Inti (<i>K_g</i>).....	9
2.3.3 <i>Area Product (A_p)</i>	10
2.4 Fenomena <i>Inrush Current</i>	11
2.5 Pengujian – Pengujian terhadap Transformator.....	13
BAB 3 PENGUJIAN DAN SIMULASI.....	17
3.1 Spesifikasi Transformator.....	17
3.2 Penentuan Nilai Komponen dari Pemodelan Transformator.....	22
3.3 Rangkaian Ekuivalen Transformator Satu Fasa.....	22
3.4 Rangkaian Ekuivalen Transformator Tiga Fasa	26
BAB 4 HASIL DAN ANALISIS	29
4.1 Karakteristik Transformator	29
4.1.1 Distribusi Kerapatan Fluks.....	31

4.1.2	Induktansi Nonlinear	33
4.1.3	Harmonisa.....	38
4.2	<i>Inrush Current</i>	40
BAB 5 PENUTUP		43
5.1	Kesimpulan.....	43
5.2	Penelitian Selanjutnya	43
DAFTAR PUSTAKA.....		45
BIOGRAFI PENULIS		47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema umum sistem tenaga listrik.....	3
Gambar 2.2 Kurva histerisis (a) dan bentuk gelombang arus magnetisasi (b) [11]	12
Gambar 2.3 Contoh kasus <i>inrush current</i> yang maksimal [11].....	12
Gambar 3.1 Rangkaian pengujian <i>inrush current</i>	18
Gambar 3.2 Rangkaian ekuivalen transformator satu fasa	19
Gambar 3.4 Metode cara potong E-I.....	20
Gambar 3.5 Metode cara Potong E-E	21
Gambar 3.6 Rangkaian magnetik pada transformator satu fasa.....	22
Gambar 3.7 Transformator tiga fasa tiga kaki	26
Gambar 3.8 Arus magnetisasi tidak simetris	26
Tabel 4.1 Data pengujian rangkaian terbuka Transformator satu fasa.....	29
Tabel 4.2 Data pengujian rangkaian terbuka Transformator tiga fasa	30
Gambar 4.1 Mesh yang dibangkitkan oleh FEM	30
Gambar 4.2 Lintasan yang diamati (A-B-C-D-A)	32
Gambar 4.3 Distribusi kerapatan fluks pada Transformator satu fasa.....	32
Gambar 4.4 Distribusi kerapatan fluks pada Transformator tiga fasa	33
Gambar 4.5 Kurva induktansi nonlinear terhadap arus magnetisasi (satu fasa) ...	34
Gambar 4.6 Kurva induktansi nonlinear terhadap arus magnetisasi (Tiga Fasa E-I)	34
Gambar 4.7 Kurva induktansi nonlinear terhadap arus magnetisasi (Tiga Fasa E- E).....	35
Gambar 4.8 Perbandingan induktansi nonlinear antara cara potong E-I dan E-E	35
Gambar 4.9 Kurva karakteristik saturasi inti pada Transformator satu fasa.....	36
Gambar 4.10 Kurva karakteristik saturasi inti (Tiga Fasa E-I).....	37
Gambar 4.11 Kurva karakteristik saturasi inti (Tiga Fasa E-E).....	37
Gambar 4.12 Perbandingan kurva karakteristik saturasi inti pada Transformator tiga fasa	38
Gambar 4.13 Spektrum harmonisa fasa A pada cara potong E-I (Tiga Fasa).....	38
Gambar 4.14 Spektrum harmonisa fasa B pada cara potong E-I (Tiga Fasa).....	39
Gambar 4.15 Spektrum harmonisa fasa C pada cara potong E-I (Tiga Fasa).....	39
Gambar 4.16 Spektrum harmonisa fasa A pada cara potong E-E (Tiga Fasa)	39
Gambar 4.17 Spektrum harmonisa fasa B pada cara potong E-E (Tiga Fasa).....	40
Gambar 4.18 Spektrum harmonisa fasa C pada cara potong E-E (Tiga Fasa).....	40
Gambar 4.19 Perbandingan <i>inrush current</i> pada transformator satu fasa.....	41
Gambar 4.20 Perbandingan <i>inrush current</i> pada transformator tiga fasa	42
Gambar 4.21 Perbandingan nilai <i>inrush current</i> berdasarkan hasil pengujian	42

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Data pengujian rangkaian terbuka Transformator satu fasa.....	29
Tabel 4.2 Data pengujian rangkaian terbuka Transformator tiga fasa.....	30

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Inrush current dapat menyebabkan kerusakan peralatan dan mengurangi kualitas daya pada sistem. Sehingga prediksi lonjakan arus merupakan hal yang penting saat proses desain dan hal tersebut diinformasikan di dalam literatur teknis [1]. Besarnya *inrush current* dipengaruhi oleh parameter desain. Berdasarkan hasil pengujian, diketahui bahwa semakin besar kapasitas transformator maka semakin kecil rasio perbandingan nilai *inrush current* dan arus nominal [2]. Dengan menggunakan *finite-element method*, diketahui bahwa cara potong dan jenis material inti mempengaruhi kurva magnetisasi dan *inrush current* pada transformator. Besarnya *inrush current* didapatkan berdasarkan hasil perhitungan. Parameter-parameter yang digunakan pada perhitungan tersebut didapatkan dari kurva magnetisasi [3]. Telah banyak dilakukan pemodelan berdasarkan rangkaian ekuivalen pada transformator satu fasa dan tiga fasa [4-9]. Pada beberapa pemodelan transformator tiga fasa, rugi-rugi inti besi diabaikan. Akibat adanya fluks yang saling terkait antar belitan, maka pemodelan transformator tiga fasa satu inti menjadi lebih rumit. Sehingga untuk memahami hal tersebut, perlu dilakukan analisis mengenai distribusi kerapatan fluks pada inti. Pada studi sebelumnya membahas mengenai pengaruh cara potong dan jenis material inti terhadap kurva magnetisasi dan *inrush current* berdasarkan simulasi [3]. Pada studi ini dilakukan simulasi dan eksperimen pada transformator satu fasa 1-kVA dan tiga fasa 3-kVA. Cara potong E-I dan E-E digunakan pada transformator uji. Rugi-rugi inti besi juga dipertimbangkan pada model simulasi berbasis rangkaian ekuivalen. Besarnya *inrush current* didapatkan dari simulasi tersebut. Karakteristik *inrush current* yang dipengaruhi cara potong inti dibandingkan antara hasil simulasi tersebut dan eksperimen. Sedangkan besarnya distribusi fluks didapatkan dari simulasi berbasis *finite-element method* (FEM).

Permasalahan yang dibahas dalam studi ini adalah pengaruh cara potong inti terhadap *inrush current* pada transformator satu fasa 1-kVA dan tiga fasa 3-kVA. Besarnya rugi-rugi inti besi pada rangkaian ekivalen juga diperhitungkan.

Sedangkan tujuan yang ingin dicapai dalam studi ini adalah untuk mengetahui pengaruh cara potong inti terhadap *inrush current* pada transformator satu fasa 1-kVA dan tiga fasa 3-kVA.

Masalah dalam studi ini dibatasi pada cara potong inti transformator. Cara potong yang digunakan yaitu bentuk E-E dan E-I. Transformator uji yang digunakan adalah transformator satu fasa 1-kVA dan tiga fasa 3-kVA.

Besarnya nilai *inrush current* dapat dipengaruhi oleh beberapa parameter desain. Salah satunya adalah cara potong inti. Diharapkan hasil penelitian ini dapat sebagai saran kepada perusahaan manufaktur Transformator untuk menggunakan cara potong dengan nilai *inrush current* yang lebih kecil.

1.2 Sistematika Penulisan

Pada bab satu dibahas mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi dari penulisan.

Selanjutnya pada bab dua dibahas mengenai teori dasar transformator dan metode yang digunakan dalam pengerjaan studi ini.

Pada bab tiga dibahas mengenai pemodelan transformator dan metode eksperimen yang digunakan untuk menyelesaikan studi ini.

Selanjutnya pada bab empat dibahas tentang hasil dan analisis mengenai data yang didapatkan berdasarkan simulasi dan eksperimen.

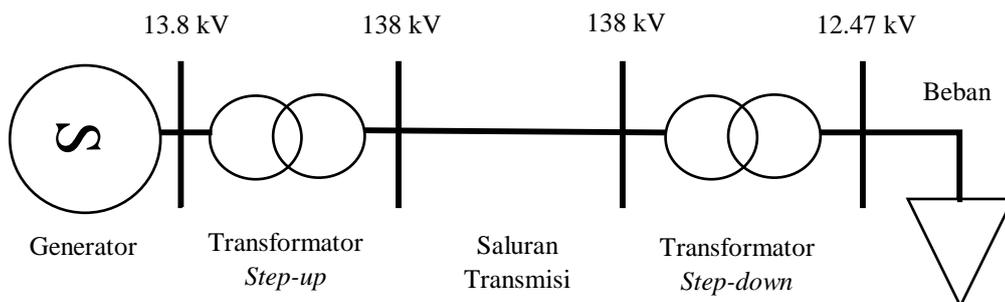
Pada bab lima dibahas mengenai kesimpulan tentang studi yang telah dilakukan, dan saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2

TRANSFORMATOR DAN FENOMENA INRUSH CURRENT

2.1 Definisi Transformator

Transformator merupakan sebuah peralatan konversi elektromagnetik. Energi listrik pada belitan primer dikonversi ke energi magnetik pada inti. Kemudian terbangkit *magnetomotive force* (mmf) pada inti, sehingga pada belitan lain dapat terbangkit energi listrik. Transformator dapat disebut sebagai Transformator *step-up* atau *step-down*, tergantung dengan besarnya tegangan sekunder. Apabila tegangan sekunder lebih kecil dari tegangan primer maka disebut Transformator *step-down*, jika sebaliknya maka disebut Transformator *step-up*. Transformator dapat digunakan sebagai *step-up* dan *step-down* sesuai dengan kebutuhan dan aplikasinya. Pada sistem tenaga listrik umumnya, Transformator *step-up* digunakan saat menghubungkan generator dengan saluran transmisi. Sedangkan Transformator *step-down* digunakan untuk menghubungkan saluran transmisi dengan saluran distribusi. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Gambar 2.1 merupakan contoh skema penggambaran sistem tenaga. Untuk alasan efisiensi dan biaya, generator didesain untuk menghasilkan daya listrik pada level tegangan antara 10 hingga 40 kV. Sedangkan untuk saluran transmisi dengan jarak yang jauh menggunakan level tegangan antara 100-500 kV, teknologi sistem transmisi sekarang bahkan dapat mencapai level tegangan 765 kV. Sehingga dibutuhkan transformator untuk menghubungkan kedua level tegangan yang berbeda tersebut.



Gambar 2.1 Skema umum sistem tenaga listrik

Pada saat ini, biasanya menggunakan lebih dari satu Transformator *step-down* dari transmisi hingga menuju distribusi akhir. Dikarenakan pada sistem distribusi memiliki beberapa level tegangan, antara lain 20 kV, 11 kV, 6.6 kV, 3.3 kV dan lain-lain. Perbedaan jenis transformator dipengaruhi oleh penggunaannya, metode pendinginannya, atau konstruksi dari rangkaian magnetiknya. Sebagian besar diklasifikasi berdasarkan rating daya dan tegangannya. Transformator dengan daya hingga 2.5 MVA dan tegangan hingga 36 kV disebut sebagai Transformator distribusi, sedangkan semua transformator dengan rating yang lebih tinggi diklasifikasikan sebagai Transformator daya.

Transformator daya didefinisikan oleh ANSI / IEEE sebagai transformator yang mentransfer energi listrik dari generator hingga distribusi. Jika diklasifikasikan berdasarkan ruang lingkup aplikasinya, maka transformator yang terhubung langsung dengan pembangkit disebut sebagai transformator pembangkit. Daya pada transformator daya dapat mencapai 1000 MVA.

Sedangkan transformator distribusi digunakan di sistem distribusi untuk menyalurkan energi dari jaringan tegangan menengah ke jaringan tegangan rendah pada konsumen. Berdasarkan ANSI / IEEE, transformator distribusi didefinisikan sebagai sebuah transformator yang mengirim energi listrik dari rangkaian distribusi primer ke rangkaian distribusi sekunder atau rangkaian yang melayani konsumen. Ada juga beberapa transformator yang digunakan untuk tujuan spesial, antara lain Transformator konverter, Transformator uji, Transformator pengukuran atau Transformator telekomunikasi dimana keduanya dapat diklasifikasikan sebagai Transformator daya dan Transformator distribusi sesuai dengan daya dan tegangannya.

Berdasarkan metode pendinginannya, transformator dapat didesain sebagai transformator tipe kering atau *oil-immersed*. Pada Transformator *oil-immersed*, media isolasinya adalah minyak mineral atau cairan isolasi sintetik. Sementara pada tipe kering, pendinginannya diimplementasikan dari sirkulasi udara yang alami.

Identifikasi dari transformator *oil-immersed* berdasarkan dari metode pendinginannya diekspresikan oleh standar IEEE C57.12.00 dan standar IEC

60076-2. Huruf pertama menunjukkan media pendinginan internal yang kontak dengan belitan. Terdapat tiga huruf, yaitu:

- Huruf “O” digunakan untuk minyak mineral atau cairan isolasi sintetik dengan titik api di bawah 300 °C.
- Huruf “K” digunakan untuk cairan isolasi dengan titik api di atas 300 °C.
- Huruf “L” digunakan untuk cairan isolasi dengan titik api yang tidak dapat diukur.

Huruf kedua mengidentifikasi mekanisme sirkulasi untuk media pendinginan internal, yaitu:

- Huruf “N” menunjukkan *natural convection flow* yang melalui peralatan pendinginan dan di dalam belitan.
- Huruf “F” menunjukkan *forced circulation* yang melalui peralatan pendinginan (contoh: pompa pendingin) dan aliran konveksi alami di dalam belitan (juga disebut aliran tidak langsung).
- Huruf “D” menunjukkan *forced circulation* melalui peralatan pendingin, langsung dari peralatan pendingin setidaknya hingga ke belitan utama.

Huruf ketiga memberikan informasi mengenai media pendinginan eksternal, antara lain:

- Huruf “A” berarti udara.
- Huruf “W” berarti air.

Huruf keempat mengekspresikan tentang mekanisme sirkulasi untuk media pendinginan eksternal, berikut penjelasan detail nya:

- Huruf “N” menunjukkan konveksi natural.
- Huruf “F” menunjukkan *forced circulation*, contohnya adalah *fans* (pendinginan udara) atau pompa (pendinginan air).

Contohnya jika media pendinginan internal adalah minyak, dimana sirkulasinya adalah aliran yang alami, dan media pendinginannya eksternalnya adalah udara, dimana sirkulasinya adalah aliran yang alami. Maka metode pendinginannya diberi kode ONAN (*Oil Natural Air Natural*). Sehingga pada aplikasinya, terdapat beberapa kode metode pendinginan yaitu ONAF (*Oil Natural Air Forced*), OFAN (*Oil Forced Air Natural*), OFAF (*Oil Forced Air Forced*),

OFWF (*Oil Forced Water Forced*). Juga terdapat beberapa kombinasinya, salah satu contohnya adalah ONAN / ONAF.

2.2 Konstruksi

2.2.1 Tipe Inti

Bagian inti yang dikelilingi oleh belitan disebut dengan *limb* atau *leg*. Bagian lain yang tidak dikelilingi oleh belitan, tetapi dilewati oleh jalur fluks disebut dengan *yoke*. Tipe konstruksi *Core* lebih umum digunakan dan memiliki beberapa keunggulan:

- Konstruksinya lebih sederhana.
- Pendinginannya lebih baik.
- Lebih mudah diperbaiki.

Tipe konstruksi *Shell* memiliki kelebihan yaitu dapat menggunakan konstruksi *sandwich* pada belitan tegangan rendah dan tegangan tinggi untuk mendapatkan impedansi yang sangat rendah (jika diinginkan karena sulit diimplementasikan pada tipe konstruksi *core*).

Konstruksi inti bergantung dari spesifikasi teknis, batasan perakitan, dan pertimbangan transportasi. Lebih ekonomis jika seluruh belitan tiga fasa digunakan pada satu bingkai inti. Transformator tiga fasa lebih murah (sekitar 20 - 25%) dibandingkan dengan tiga transformator satu fasa yang terhubung dalam 1 *bank*. Akan tetapi dari pertimbangan unit cadangan, pengguna lebih ekonomis jika membeli empat transformator satu fasa dibandingkan membeli dua transformator tiga fasa. Dan juga jika rating transformator tiga fasa terlalu besar untuk dibuat dan ditransportasikan oleh perusahaan manufaktur (berat dan dimensi bergantung dari kapabilitas perusahaan manufaktur). Tidak ada pilihan lain selain menggunakan unit satu fasa.

Pada transformator satu fasa dengan inti *three-limb*, belitan terletak pada *central limb (main limb)*. Flux di *main limb* terbagi secara rata antara dua *yokes* dan kembali melalui *end limbs*. Area *Yoke* dan *end limb* hanya sebesar 50 % dari area *main limb* untuk kerapatan fluks yang sama. Tipe konstruksi ini dapat disebut dengan transformator satu fasa tipe *shell*. Impedansi urutan nol sebanding dengan impedansi urutan positif untuk konstruksi ini.

Pada transformator satu fasa, belitan juga bisa dipecah menjadi dua bagian dan diletakkan mengelilingi dua *limb*. Konstruksi ini biasa digunakan untuk rating yang sangat besar. Magnitudo dari hubung singkat lebih rendah dikarenakan fakta bahwa *ampere-turns* / tinggi berkurang. Area dari *limb* dan *yoke* nya sama.

Konstruksi yang umum digunakan untuk transformator rating kecil dan menengah adalah konstruksi tiga fasa *three-limb*. Untuk masing – masing fasa, *limb flux* kembali melalui *yokes* dan dua *limb* lainnya. Pada konstruksi ini, *limbs* dan *yokes* biasanya memiliki area yang sama. Kadang-kadang *yokes* memiliki 5 % area tambahan jika dibandingkan dengan *limbs* untuk mengurangi rugi-rugi tanpa beban. Perlu dicatat bahwa peningkatan 5 % area di *yokes* mengurangi kerapatan fluks sebesar 5 % di *yokes*, mengurangi *watts/kg* lebih dari 5 % (disebabkan oleh karakteristik non-linear) tetapi berat *yoke* meningkat 5 %. Kemungkinan mungkin juga terjadi tambahan rugi-rugi diakibatkan oleh persilangan fluks yang disebabkan oleh persesuaian yang tidak sempurna antara *lamination steps* pada *limb* dan *yoke* pada sambungan. Meskipun pengurangan rugi-rugi tidak signifikan. Perluasan area *yoke* dapat meningkatkan kinerja saat kondisi eksitasi berlebih. *Eddy losses* pada bagian struktur berkurang, diakibatkan oleh kebocoran fluks yang keluar dari inti diakibatkan oleh saturasinya saat kondisi eksitasi berlebih. Konstruksi tiga fasa *three-limb* yang memiliki sifat tiga fasa tidak simetris menghasilkan arus tanpa beban yang tidak seimbang dan rugi-rugi tiga fasa. Dapat memiliki sifat inti simetris dengan cara mengoneksikan belitan secara *delta* atau *wye*. Konstruksi ini menghasilkan berat inti dan ukuran tangki yang minimal, tetapi jarang digunakan karena kompleksitas di perakitan.

2.2.2 Dampak dari Proses Perakitan pada Kinerja Inti

Keseluruhan proses dari laminasi dapat meningkatkan rugi-rugi besi. Efek ini dapat dimitigasi dengan cara melunakkan laminasi pada temperatur sekitar 800°C. *Limb* pada inti umumnya dibuat dari step dalam jumlah besar untuk mendapatkan area inti yang maksimal untuk diameter inti yang diberikan agar mencapai desain optimal. *Yokes* memiliki step yang lebih sedikit untuk menyediakan *axial support* yang lebih baik pada belitan. Ketidaksesuaian jumlah step pada *limbs* dan *yoke* dapat menghasilkan rugi-rugi ekstra pada sudut gabungan.

2.3 Parameter – Parameter Transformator

2.3.1 Output Power (P_o) versus Apparent Power (P_t)

Daya output (P_o) merupakan komponen yang paling menarik bagi pengguna. Untuk desainer transformator, daya nyata (P_t) yang berhubungan dengan geometris dari Transformator merupakan hal yang paling utama. Agar lebih sederhana, diasumsikan bahwa inti hanya memiliki dua belitan pada *window area*, yaitu belitan primer dan sekunder. Diasumsikan juga bahwa *window area* (W_a) dibagi sesuai dengan kemampuan belitan menggunakan kerapatan arus yang sama. Belitan primer (P_{in}) dan sekunder (P_o) menuju beban. Karena transformator daya didesain untuk memenuhi sisi primer, maka P_{in} dan P_o

Secara definisi

$$P_t = P_{in} + P_o \text{ [watts]} \quad (2.1)$$

$$P_{in} = \frac{P_o}{\eta} \text{ [watts]} \quad (2.2)$$

Belitan primer dapat diekspresikan menggunakan hukum Faraday:

$$N_p = \frac{V_p(10^4)}{A_c B_{ac} f K_f} \text{ [turns]} \quad (2.3)$$

Area belitan pada Transformator terpenuhi ketika:

$$K_u W_a = N_p A_{wp} + N_s A_{ws} \quad (2.4)$$

Wire area didefinisikan sebagai:

$$A_w = \frac{1}{J} \text{ [cm}^2\text{]} \quad (2.5)$$

Sehingga persamaannya menjadi:

$$K_u W_a = N_p \left(\frac{I_p}{J} \right) + N_s \left(\frac{I_s}{J} \right) \quad (2.6)$$

Substitusi ke dalam persamaan Faraday:

$$K_u W_a = \frac{V_p(10^4)}{A_c B_{ac} f K_f} \left(\frac{I_p}{J} \right) + \frac{V_s(10^4)}{A_c B_{ac} f K_f} \left(\frac{I_s}{J} \right) \quad (2.7)$$

$$W_a A_c = \frac{[(V_p I_p) + (V_s I_s)](10^4)}{B_{ac} f J K_f K_u} \text{ [cm}^4\text{]} \quad (2.8)$$

Daya Output P_o

$$P_o = V_s I_s \text{ [watts]} \quad (2.9)$$

Daya input P_{in}

$$P_{in} = V_p I_p \text{ [watts]} \quad (2.10)$$

Maka

$$P_t = P_{in} + P_o \text{ [watts]} \quad (2.11)$$

2.3.2 Geometris Inti (K_g)

Meskipun sebagian besar transformator didesain berdasarkan kenaikan temperatur, transformator dapat didesain berdasarkan *regulation* juga. Kemampuan daya dan *regulation* pada inti berhubungan dengan dua konstanta yaitu K_g dan K_e , berdasarkan persamaan:

$$P_t = 2 K_g K_e \alpha \text{ [watts]} \quad (2.12)$$

Dimana

$$\alpha = \text{Regulation} [\%] \quad (2.13)$$

Konstanta (K_g) merupakan fungsi geometri inti:

$$K_g = f(A_c, W_a, MLT) \quad (2.14)$$

Dimana:

MLT = Mean Length Turn (cm)

Konstanta (K_e) merupakan fungsi kondisi operasi magnetik dan elektrik:

$$K_e = g(f, B_m) \quad (2.15)$$

Diasumsikan tidak ada rugi-rugi inti:

$$\alpha = \frac{\Delta V_p}{V_p} (100) + \frac{\Delta V_s}{V_s} (100) \quad (2.16)$$

$$I_{in} = I_o$$

Maka

$$\Delta V_p = I_p R_p = \Delta V_s = I_s R_s \text{ [volts]}$$

$$\alpha = 2 \frac{I_p R_p}{V_p} (100)$$

$$\alpha = 2 \frac{I_p R_p}{V_p} \left(\frac{V_p}{V_p} \right)$$

$$\alpha = 200 \frac{V_a R_p}{V_p^2} \quad (2.17)$$

Berdasarkan persamaan *resistivity*, maka:

$$R_p = \frac{(MLT) N_p^2}{W_a K_p} \rho \quad (2.18)$$

Dimana:

$$\rho = 1.724 (10^{-6}) \text{ ohm cm}$$

K_p merupakan *window utilization factor* (primer)

K_s merupakan *window utilization factor* (sekunder)

$$K_p = \frac{K_u}{2} = K_s \quad (2.19)$$

Hukum Faraday yang diekspresikan di dalam *metric unit*:

$$V_p = K_f f N_p A_c B_m (10^{-4}) \quad (2.20)$$

Dimana:

$K_f = 4.0$ untuk gelombang kotak

$K_f = 4.44$ untuk gelombang sinus

VA primer adalah

$$VA = \frac{V_p^2}{200 R_p} \alpha \quad (2.21)$$

Substitusi R_p dan V_p dengan persamaan (2.18) dan (2.20), sehingga:

$$VA = \frac{(K_f f N_p A_c B_m (10^{-4})) (K_f f N_p A_c B_m (10^{-4}))}{200 \left(\frac{(MLT) N_p^2}{2(W_a K_p) \rho} \right)} \alpha \quad (2.22)$$

Disederhanakan menjadi:

$$VA = \frac{(K_f^2 f^2 A_c^2 B_m^2 W_a K_p (10^{-10}))}{2(MLT)\rho} \alpha \quad (2.23)$$

$\rho = 1.724(10^{-6})$, maka:

$$VA = \frac{(0.29 K_f^2 f^2 A_c^2 B_m^2 W_a K_p (10^{-4}))}{MLT} \alpha \quad (2.24)$$

Sehingga belitan primer sebanding dengan:

$$K_e = (0.29 K_f^2 f^2 B_m^2 (10^{-4})) \quad (2.25)$$

Sehingga geometris inti sebanding dengan:

$$K_g = \frac{W_a A_c^2 K_p}{MLT} [cm^5] \quad (2.26)$$

Maka

$$VA = K_e K_g \alpha \quad (2.27)$$

2.3.3 Area Product (A_p)

Hubungan antara kapabilitas daya mampu pada Transformator dan *area product*, dapat dijelaskan sebagai berikut:

Substitusi persamaan (2.11) ke dalam persamaan (2.8)

$$W_a A_c = \frac{P_t(10^4)}{B_{acf} J K_f K_u} [cm^4] \quad (2.28)$$

Berdasarkan definisi:

$$A_p = W_a A_c \quad (2.29)$$

Maka

$$A_p = \frac{P_t(10^4)}{B_{acf} J K_f K_u} [cm^4] \quad (2.30)$$

2.4 Fenomena *Inrush Current*

Ketika transformator di-*switch off*, arus eksitasi mengikuti kurva histerisis menuju ke nol, dimana nilai kerapatan fluks berubah ke nilai yang tidak nol disebut fluks sisa (B_r). Untuk kerapatan fluks sisa, lonjakan arus maksimal digambarkan ketika Transformator di-*switch on* secara instan ketika tegangan terapannya adalah nol, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3. Jika transformator tidak di-*switch off*, arus eksitasi dan kerapatan fluks akan mengikuti *dotted curves*. Sesuai dengan teori *constant flux linkage*, fluks magnet pada rangkaian induktif tidak dapat berubah secara tiba-tiba: fluks setelah penutupan saklar (saat $t=0^+$) harus sebanding dengan fluks sebelum penutupan saklar ($t=0^-$). Karenanya sebagai gantinya memulai dari nilai negatif maksimal ($-B_{mp}$), kerapatan fluks berawal dari $+B_r$ dan mencapai nilai puncak positif ($B_r + 2B_{mp}$) sehingga inti mencapai kondisi saturasinya. Untuk tegangan terapan yang sinus, kerapatan fluks nya juga berbentuk sinus dan arus magnetisasinya berpuncak runcing secara alami. Hasil yang sama didapatkan dengan cara menyelesaikan persamaan berikut:

$$V_p \sin(\omega t + \theta) = i_0 R_1 + N_1 \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.31)$$

Dimana

V_p = nilai puncak dari tegangan terapan

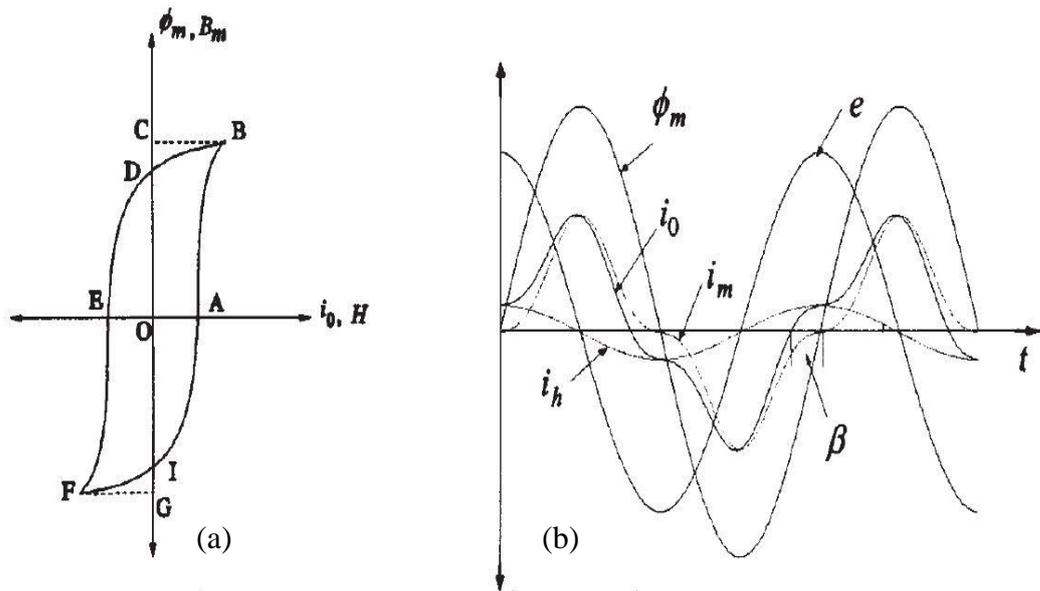
θ = sudut ketika tegangan di – switch on

i_0 = nilai seketika dari arus magnetisasi

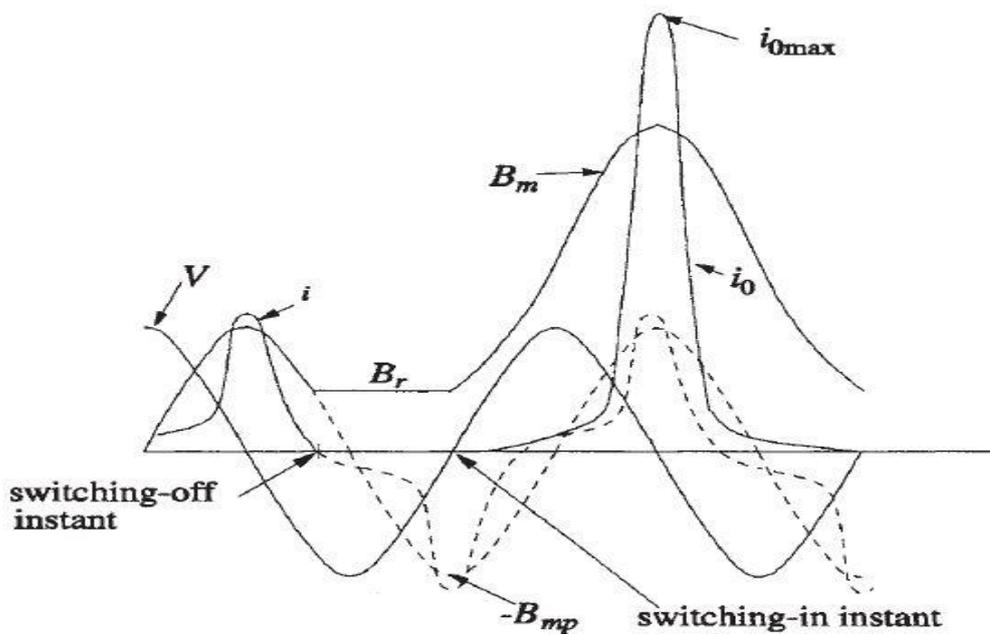
ϕ_m = nilai seketika dari fluks saat waktu t

R_1 = resistansi belitan primer

N_1 = jumlah kumparan pada belitan primer



Gambar 2.2 Kurva histerisis (a) dan bentuk gelombang arus magnetisasi (b) [11]



Gambar 2.3 Contoh kasus *inrush current* yang maksimal [11]

Solusi didapatkan dengan cara kondisi awal saat $t = 0$, $\phi_m = \pm \phi_r$,

$$\phi_m = (\phi_{mp} \cos \theta \pm \phi_r) e^{-\frac{R_1 t}{L_1}} - \phi_{mp} \cos(\omega t + \theta) \quad (2.32)$$

Berdasarkan persamaan 2.32, menunjukkan bahwa fluks memiliki komponen DC, dimana laju peluruhannya ditentukan oleh rasio resistansi dan induktansi (R_1/L_1) pada belitan primer, dan komponen AC kondisi tunak ($-\Phi_{mp} \cos(\omega t + \theta)$).

Dapat dianalisis bahwa bentuk gelombang arus *offset* secara keseluruhan pada beberapa siklus awal dikarenakan kerapatan fluks berada di bawah nilai saturasi. Oleh karena itu, *inrush current* sangat tidak simetris dan memiliki komponen utama harmonik kedua yang digunakan oleh skema proteksi *differential* untuk menahan operasi rele.

Konstanta waktu (L/R) pada rangkaian tidak konstan; nilai induktansi berubah-ubah tergantung dari tingkat saturasi pada inti. Selama beberapa siklus awal, saturasinya tinggi dan induktansi rendah. Oleh karena itu, laju awal dari peluruhan *inrush current* sangat tinggi. Saat saturasi menurun, Kenaikan nilai induktansi memperlambat peluruhan. Sehingga peluruhan *inrush current* berawal dari laju awal yang tinggi dan berkurang secara bertahap; fenomena berakhir pada beberapa detik. Transformator yang lebih kecil memiliki laju peluruhan yang lebih tinggi. Pada umumnya, Transformator yang memiliki rugi – rugi yang lebih besar (Efisiensi yang lebih rendah) memiliki laju peluruhan *inrush current* yang lebih tinggi.

2.5 Pengujian – Pengujian terhadap Transformator

Ada beberapa macam tes yang dilakukan manufaktur untuk memastikan Transformator sesuai dengan standar.

- Pengujian operasi *load tap changers*
 1. Untuk menjamin seluruh *tap changer switch* dalam kondisi yang baik.
 2. Untuk menjamin seluruh *tap changer* berfungsi baik ketika Transformator berbeban dan tanpa beban.
- Pengukuran resistansi isolasi dan indeks polarisasi
 1. Tujuannya pengujian resistansi isolasi adalah untuk mengukur kondisi sistem isolasi utama, contohnya isolasi antara belitan dan *ground* atau antara dua belitan.

2. Tujuan dari pengujian indeks polarisasi adalah untuk menentukan jika peralatan sesuai dengan operasi atau bahkan untuk pengujian tegangan lebih. Indeks polarisasi adalah rasio dari resistansi *mega ohm* ketika 10 menit dan 1 menit dengan tegangan 5000 V dc.
 - Pengecekan isolasi inti dan *frame* pada Transformator *oil-immersed*
Untuk memastikan resistansi isolasi inti dan *frame* dalam kondisi baik
 - Pengujian tegangan tembus pada minyak Transformator
Untuk mengetahui kapasitas kemampuan elektrik dari minyak Transformator.
 - Pengukuran resistansi belitan
Untuk mengukur resistansi belitan terkait dengan perhitungan rugi – rugi tembaga.
 - Pengukuran rasio tegangan dan pengecekan pergeseran fasa
 1. Untuk mengetahui rasio dari masing – masing fasa dan masing – masing *tapping*.
 2. Untuk memastikan bahwa simbol koneksi (grup vektor) pada masing – masing Transformator yang diuji sesuai dengan spesifikasinya.
 - Pengukuran kapasitansi dan faktor disipasi ($\tan \delta$)
Untuk mengukur kapasitansi dan faktor disipasi pada belitan dan *bushing* pada Transformator.
 - Pengukuran impedansi hubung singkat dan rugi - rugi beban
Untuk mengukur rugi – rugi tembaga dan impedansi hubung singkat pada Transformator sebagai validasi dari perhitungan dan jaminan.
 - Pengukuran rugi – rugi dan arus tanpa beban
Untuk mengukur rugi – rugi inti dan arus eksitasi pada Transformator sebagai validasi dari perhitungan dan jaminan.
 - Pengujian impuls petir
Untuk memverifikasi kemampuan ketahanan impuls pada masing – masing terminal saluran ke tanah dan belitan lainnya dan pada belitan yang sedang diuji.
 - Pengujian Tegangan Terapan

Pengujian ini untuk memverifikasi kemampuan ketahanan AC pada terminal saluran dan netral dan belitannya yang terhubung dengan tanah.

- Pengujian ketahanan terminal saluran AC
Untuk memverifikasi kemampuan ketahanan AC pada masing – masing terminal dan belitannya yang terhubung dengan tanah dan belitan lain, kemampuan ketahanan antara fasa dan belitan yang sedang diuji.
- Pengukuran peluahan sebagian
Untuk memverifikasi kualitas dari isolasi sistem menggunakan pengukuran peluahan sebagian.
- Pengujian kenaikan temperatur
Pengujian kenaikan temperatur pada Transformator daya saat rugi – rugi total. Pengujian ini dilakukan sebagai validasi dari perhitungan.
- Menentukan tingkat tekanan suara
Untuk mengukur tingkat tekanan suara dari Transformator daya saat tegangan rating dan frekuensi rating.
- Pengukuran daya yang digunakan oleh *fan motors*
Untuk mengukur rugi – rugi *fans* dari Transformator sebagai validasi dari perhitungan.
- Pengukuran impedansi urutan nol pada Transformator tiga fasa
Untuk mendeteksi dan mengukur kapasitas impedansi urutan nol saat frekuensi rating antara terminal yang dihubung singkat dan terminal netral.
- Pengujian fungsi peralatan tambahan
Untuk mengukur keseluruhan bagian tambahan dari Transformator daya dapat berfungsi seharusnya, termasuk rasio *current Transformer* (CT).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

PENGUJIAN DAN SIMULASI

Pada studi ini dilakukan pengujian dan simulasi. Ada tiga pengujian yang dilakukan, yaitu pengujian rangkaian terbuka (digunakan untuk mendapatkan kurva saturasi inti), pengujian rangkaian tertutup (digunakan untuk mendapatkan parameter belitan transformator), dan pengujian *inrush current*. Pengujian *inrush current* dilakukan dengan cara menginjeksikan sumber tegangan ke dalam transformator dalam kondisi tanpa beban. Agar didapatkan kondisi yang sama, maka sumber tegangan terhubung saat sudut 0° dan dilakukan demagnetisasi setelah pengujian. Rangkaian pengujian *inrush current* ditunjukkan pada gambar 3.1. Dilakukan 10 kali pengujian *inrush current* pada masing-masing transformator. Pemodelan simulasi yang dilakukan berdasarkan rangkaian ekuivalen pada gambar 3.2 dan 3.3. Parameter-parameternya didapatkan dari pengujian rangkaian terbuka (L_m dan R_c) dan pengujian rangkaian tertutup ($L_{p,s}$ dan $r_{p,s}$).

3.1 Spesifikasi Transformator

Pada studi ini digunakan dua cara potong yang berbeda, yaitu metode E-I dan metode E-E. Kedua metode digunakan pada Transformator satu fasa 1-kVA dan tiga fasa 3-kVA. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.4 dan gambar 3.5. Ukuran inti pada Transformator satu fasa dan tiga fasa hanya dibedakan ukurannya saja.

Berdasarkan gambar 3.4 dan gambar 3.5, ukuran inti yang digunakan pada Transformator satu fasa adalah sebagai berikut:

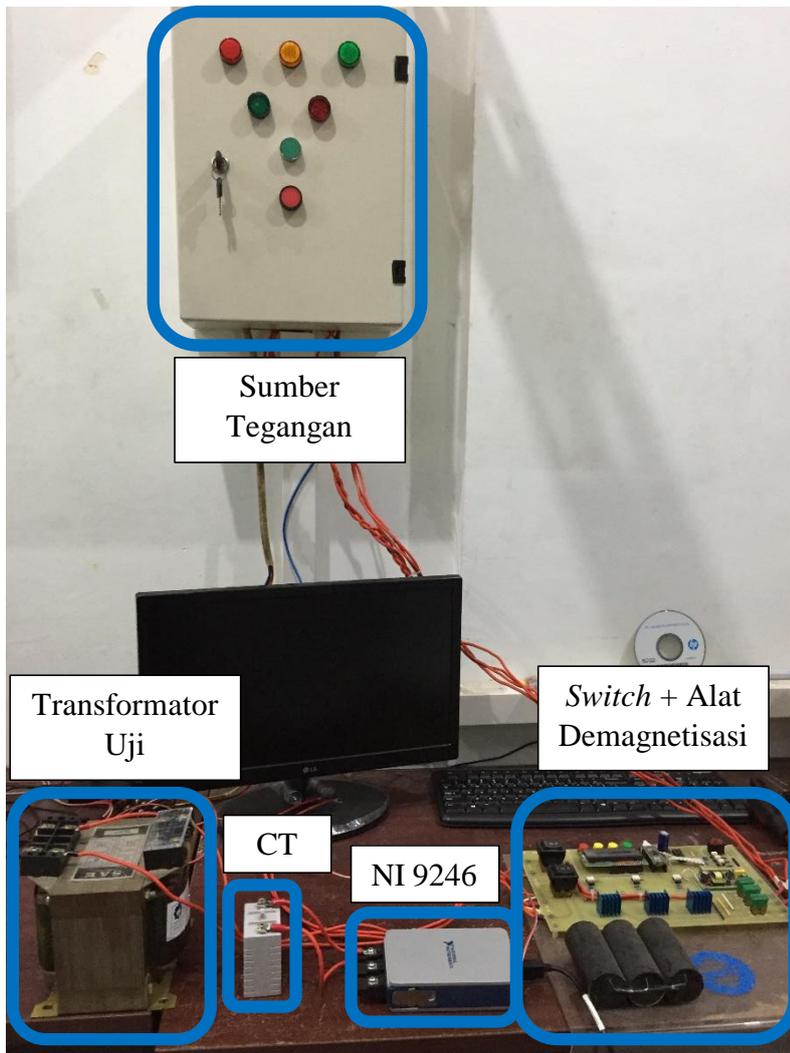
- A = 15 cm
- B = 12 cm
- C = 3 cm
- D = 9 cm

Sedangkan ukuran inti yang digunakan pada Transformator tiga fasa adalah:

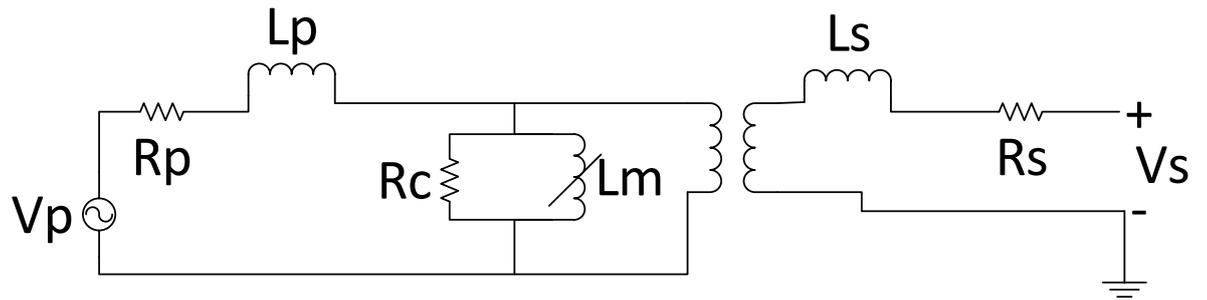
- A = 25 cm
- B = 20 cm

- $C = 5 \text{ cm}$
- $D = 15 \text{ cm}$

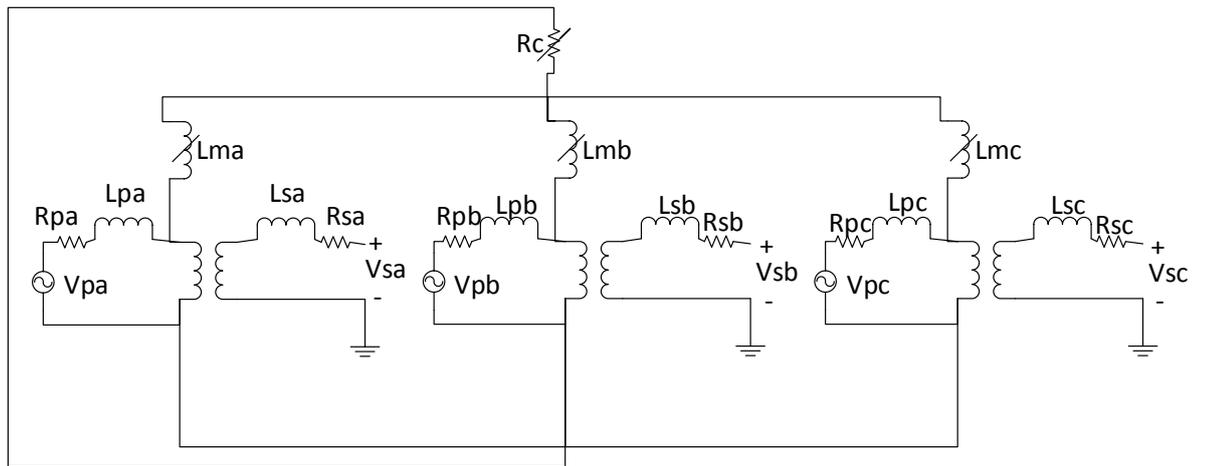
Keseluruhan Transformator memiliki rating tegangan yang sama, yaitu 220 V untuk belitan primer dan 127 V untuk belitan sekunder. Selain itu, jumlah belitannya juga sama, yaitu 255 putaran untuk belitan primer dan 147 putaran untuk belitan sekunder. Frekuensinya menggunakan 50 Hz.



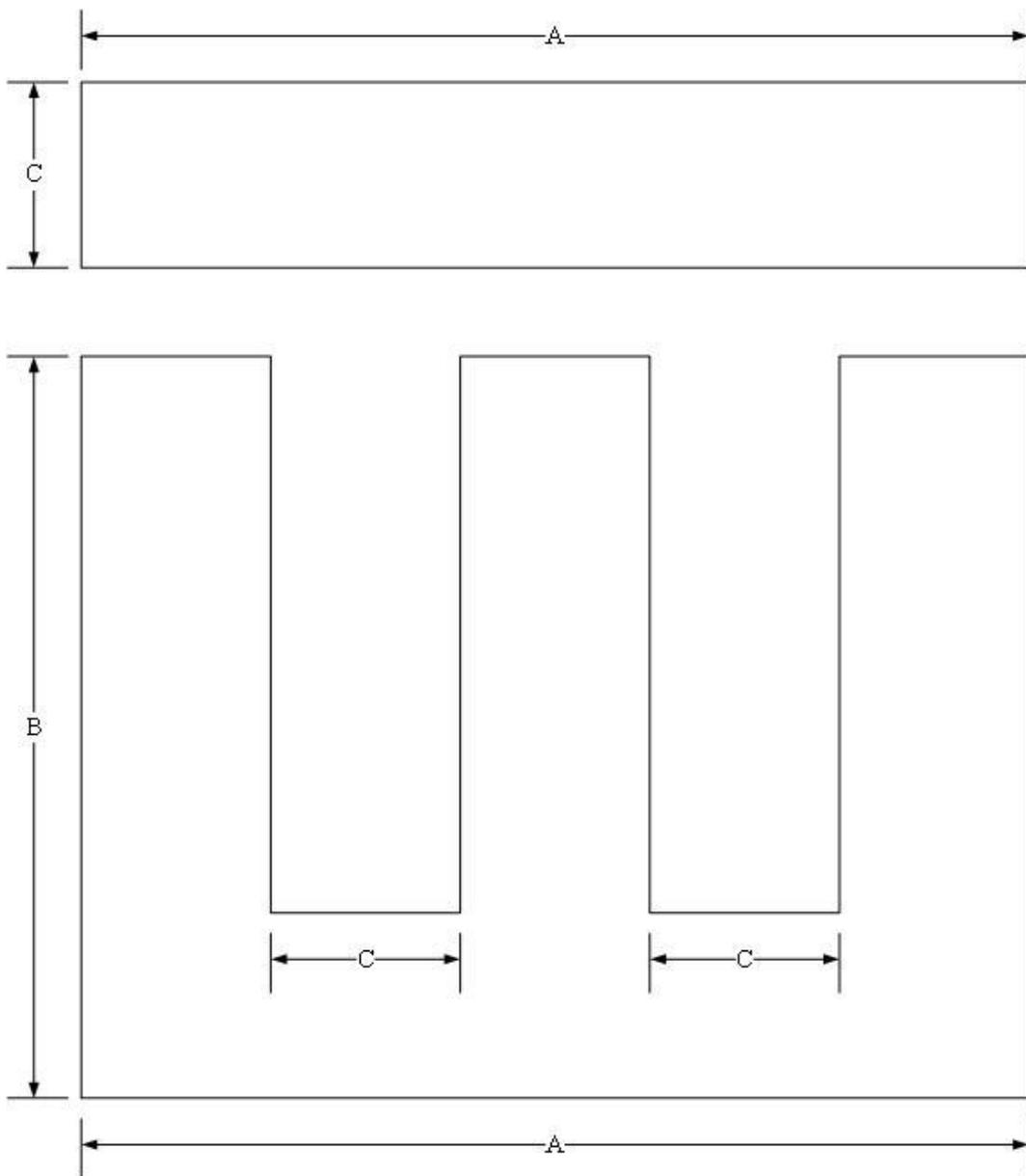
Gambar 3.1 Rangkaian pengujian *inrush current*



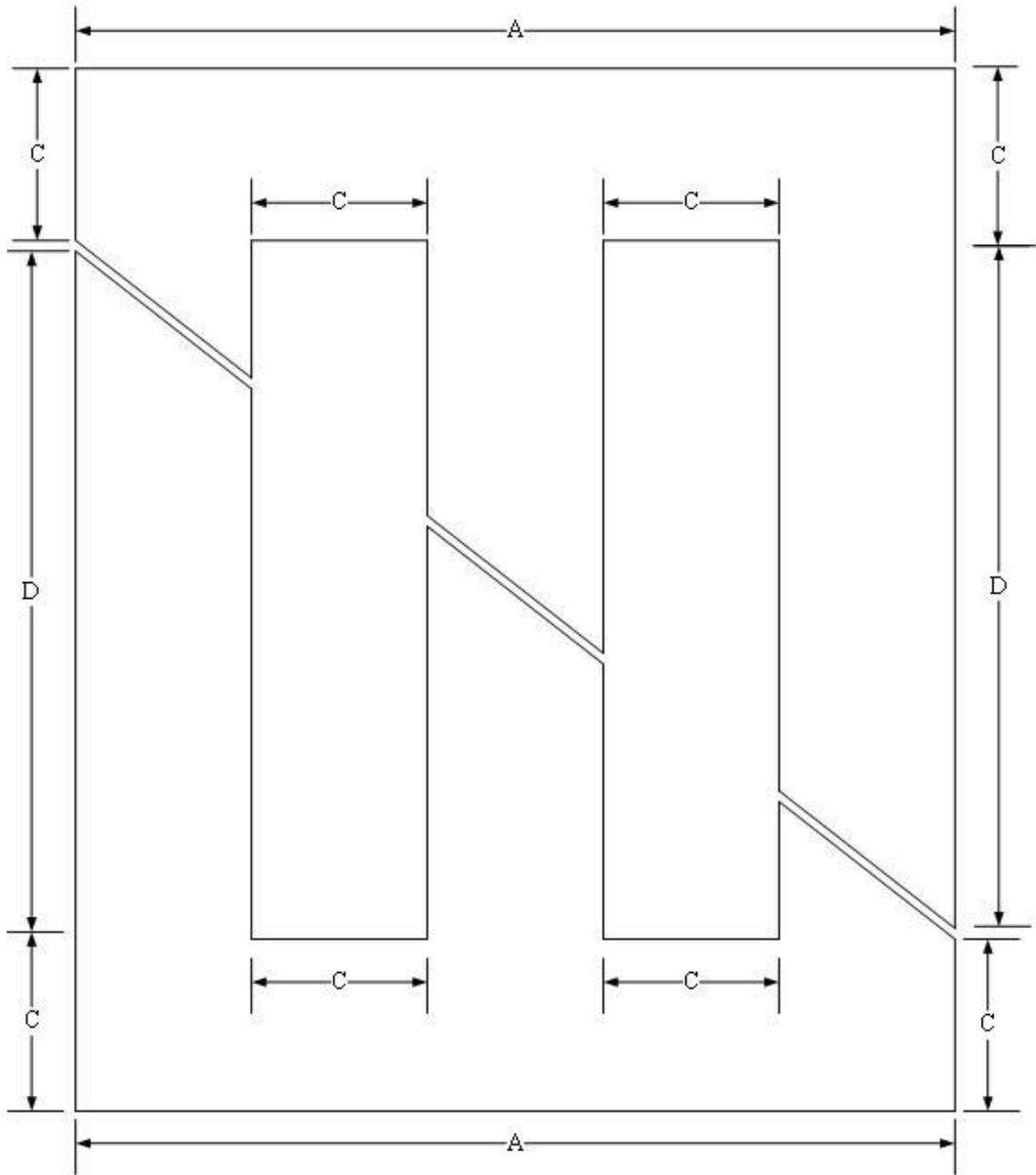
Gambar 3.2 Rangkaian ekivalen transformator satu fasa



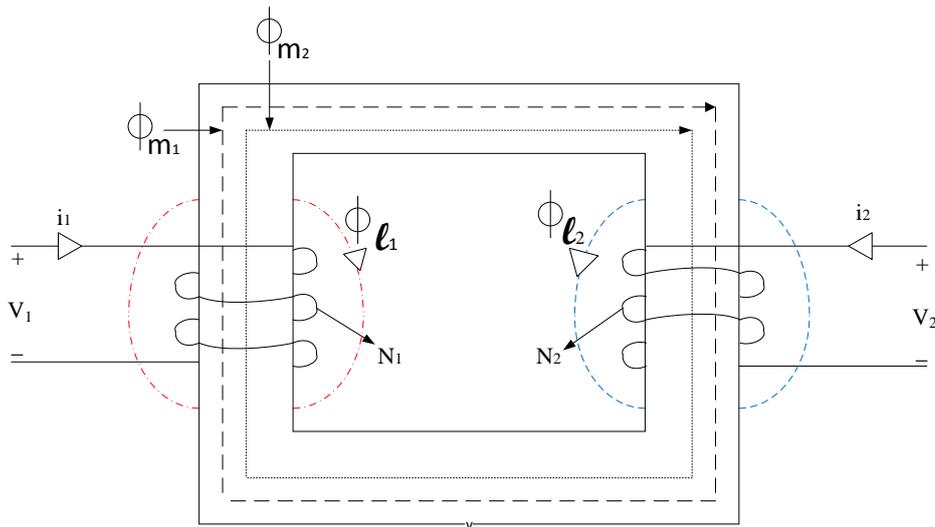
Gambar 3.3 Rangkaian ekivalen transformator tiga fasa



Gambar 3.4 Metode cara potong E-I



Gambar 3.5 Metode cara Potong E-E



Gambar 3.6 Rangkaian magnetik pada transformator satu fasa

3.2 Penentuan Nilai Komponen dari Pemodelan Transformator

Untuk mendapatkan nilai – nilai dari komponen pemodelan dari Transformator, diperlukan pengujian rangkaian tertutup dan rangkaian terbuka.

Pengujian rangkaian terbuka dilakukan dengan cara belitan sekunder pada Transformator dalam kondisi rangkaian terbuka (terminal positif dan negatifnya tidak dihubungkan). Kemudian belitan primer dihubungkan dengan sumber tegangan. Kemudian tegangan diinjeksikan ke dalam Transformator sesuai dengan tegangan ratingnya. Setelah itu diukur tegangan terapan pada belitan primer, tegangan masukan, arus masukan dan daya masukan pada Transformator.

Sedangkan untuk pengujian rangkaian tertutup, terminal sekunder pada Transformator dalam kondisi rangkaian tertutup (terminal positif dan negatifnya dihubungkan). Kemudian belitan primer dihubungkan dengan sumber tegangan yang cukup rendah. Kemudian tegangan diinjeksikan ke dalam Transformator hingga arus pada belitan yang dihubungkan singkat sesuai dengan nilai ratingnya. Kemudian diukur tegangan masukan, arus masukan, dan daya masukan.

3.3 Rangkaian Ekuivalen Transformator Satu Fasa

Parameter-parameter pada gambar 3.6 adalah sebagai berikut:

V_1 = Tegangan pada *coil* primer

- V_2 = Tegangan pada *coil* sekunder
 i_1 = Arus pada *coil* primer
 i_2 = Arus pada *coil* sekunder
 N_1 = *Coil* primer
 N_2 = *Coil* sekunder
 $\phi_{\ell 1}$ = *Leakage flux* pada *coil* primer
 $\phi_{\ell 2}$ = *Leakage flux* pada *coil* sekunder
 ϕ_{m1} = *Mutual flux* yang disebabkan oleh *coil* primer
 ϕ_{m2} = *Mutual flux* yang disebabkan oleh *coil* sekunder
 λ_1 = *Flux linkages* pada *coil* primer
 λ_2 = *Flux linkages* pada *coil* sekunder

Dari gambar di atas, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\lambda_1 = N \times \phi_1 \quad (3.1)$$

$$\lambda_2 = N \times \phi_2$$

$$\phi_1 = \phi_{m1} + \phi_{m2} + \phi_{\ell 1} \quad (3.2)$$

$$\phi_2 = \phi_{m1} + \phi_{m2} + \phi_{\ell 2}$$

Leakage flux dan mutual flux pada coil primer didapatkan dari persamaan berikut:

$$\phi_{\ell 1} = \frac{N_1 i_1}{\mathfrak{R}_{\ell 1}} \quad (3.3)$$

$$\phi_{m1} = \frac{N_1 i_1}{\mathfrak{R}_m} \quad (3.4)$$

Maka:

$$\lambda_1 = \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_{\ell 1}} i_1 + \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_m} i_1 + \frac{N_1 N_2}{\mathfrak{R}_m} i_2 \quad (3.5)$$

$$\lambda_2 = \frac{N_2^2}{\mathfrak{R}_{\ell 2}} i_2 + \frac{N_2^2}{\mathfrak{R}_m} i_2 + \frac{N_2 N_1}{\mathfrak{R}_m} i_1$$

Dari persamaan di atas, didapatkan komponen *Self-Inductance* dan *Mutual-Inductance*.

Self-Inductance:

$$L_{11} = \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_{\ell 1}} + \frac{N_1^2}{\mathfrak{R}_m} = L_{\ell 1} + L_{m1} \quad (3.6)$$

$$L_{22} = \frac{N_2^2}{\mathfrak{R}_{\ell 2}} + \frac{N_2^2}{\mathfrak{R}_m} = L_{\ell 2} + L_{m2}$$

Mutual-Inductance:

$$L_{12} = \frac{N_1 N_2}{\mathfrak{R}_m}$$

$$L_{12} = \frac{N_1^2 N_2}{\mathfrak{R}_m N_1}$$

$$L_{12} = L_{m1} \frac{N_2}{N_1} \quad (3.7)$$

$$L_{21} = \frac{N_2 N_1}{\mathfrak{R}_m}$$

$$L_{21} = L_{m1} \frac{N_1}{N_2} \quad (3.8)$$

Apabila menghubungkan antara nilai induktansi dan *flux linkage*, akan didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\lambda_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2$$

$$\lambda_1 = (L_{\ell 1} + L_{m1}) i_1 + \left(\frac{N_2}{N_1}\right) L_{m1} i_2$$

$$\lambda_1 = L_{\ell 1} i_1 + L_{m1} i_1 + \left(\frac{N_2}{N_1}\right) L_{m1} i_2$$

$$\lambda_1 = L_{\ell 1} i_1 + \left(i_1 + \left(\frac{N_2}{N_1}\right) i_2\right) L_{m1} \quad (3.9)$$

$$\lambda_2 = L_{\ell 2} i_2 + \left(i_2 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right) i_1\right) L_{m2}$$

Parameter pada *coil 2* dibawa ke *coil 1*

$$i_2' = \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad (3.10)$$

$$v_2' = \frac{N_1}{N_2} v_2 \quad (3.11)$$

$$\lambda_2' = \frac{N_1}{N_2} \lambda_2 \quad (3.12)$$

$$\lambda_2' = L'_{\ell 2} i_2' + L_{m1} (i_1 + i_2') \quad (3.13)$$

Maka:

$$\lambda_1 = L_{\ell 1} i_1 + L_{m1} (i_1 + i_2') \quad (3.14)$$

$$\lambda_2' = L'_{\ell 2} i_2' + L_{m1} (i_1 + i_2')$$

Persamaan Tegangan:

$$V_1 = r_1 i_1 + \frac{\partial \lambda_1}{\partial t} \quad (3.15)$$

$$V_2 = r_2' i_2' + \frac{\partial \lambda_2'}{\partial t}$$

$$r_2' = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 r_2$$

Jika $L_{12} = L_{21}$

$$\frac{N_2}{N_1} L_{m1} = \frac{N_1}{N_2} L_{m2}$$

$$L_{m1} = L_{m2} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (3.16)$$

Flux linkage berdasarkan persamaan (3.15)

$$\frac{\partial \lambda_1}{\partial t} = V_1 - r_1 i_1$$

$$\lambda_1 = \int (V_1 - r_1 i_1) dt \quad (3.17)$$

$$\lambda_1 = L_{l1} i_1 + L_{m1} (i_1 + i_2')$$

$$\lambda_2' = L'_{l2} i_2' + L_{m1} (i_1 + i_2')$$

Diasumsikan

$$\lambda_m = L_{m1} (i_1 + i_2') \quad (3.18)$$

maka:

$$\lambda_1 = L_{l1} i_1 + \lambda_m \quad (3.19)$$

$$i_1 = \frac{1}{L_{l1}} (\lambda_1 - \lambda_m) \quad (3.20)$$

$$\lambda_2' = L'_{l2} i_2' + \lambda_m \quad (3.21)$$

$$i_2' = \frac{1}{L'_{l2}} (\lambda_2' - \lambda_m) \quad (3.22)$$

Substitusi persamaan (3.20) ke persamaan (3.19)

$$\lambda_1 = \int \left(v_1 + \frac{r_1}{L_{l1}} (\lambda_m - \lambda_1) \right) \partial t \quad (3.23)$$

$$\lambda_2' = \int \left(v_2' + \frac{r_2'}{L'_{l2}} (\lambda_m - \lambda_2') \right) \partial t$$

Substitusi persamaan (3.20) dan (3.22) ke persamaan (3.18)

$$\lambda_m = L_{m1} \left(\frac{1}{L_{l1}} (\lambda_1 - \lambda_m) + \frac{1}{L'_{l2}} (\lambda_2' - \lambda_m) \right)$$

$$\lambda_m = \frac{L_{m1}}{L_{l1}} (\lambda_1 - \lambda_m) + \frac{L_{m1}}{L'_{l2}} (\lambda_2' - \lambda_m)$$

$$\lambda_m = \frac{L_{m1}}{L_{l1}} \lambda_1 - \frac{L_{m1}}{L_{l1}} \lambda_m + \frac{L_{m1}}{L'_{l2}} \lambda_2' - \frac{L_{m1}}{L'_{l2}} \lambda_m$$

$$\lambda_m + \frac{L_{m1}}{L_{l1}} \lambda_m + \frac{L_{m1}}{L'_{l2}} \lambda_m = \frac{L_{m1}}{L_{l1}} \lambda_1 + \frac{L_{m1}}{L'_{l2}} \lambda_2'$$

$$\lambda_m \left(1 + \frac{L_{m1}}{L_{l1}} + \frac{L_{m1}}{L'_{l2}} \right) = L_{m1} \left(\frac{\lambda_1}{L_{l1}} + \frac{\lambda_2'}{L'_{l2}} \right)$$

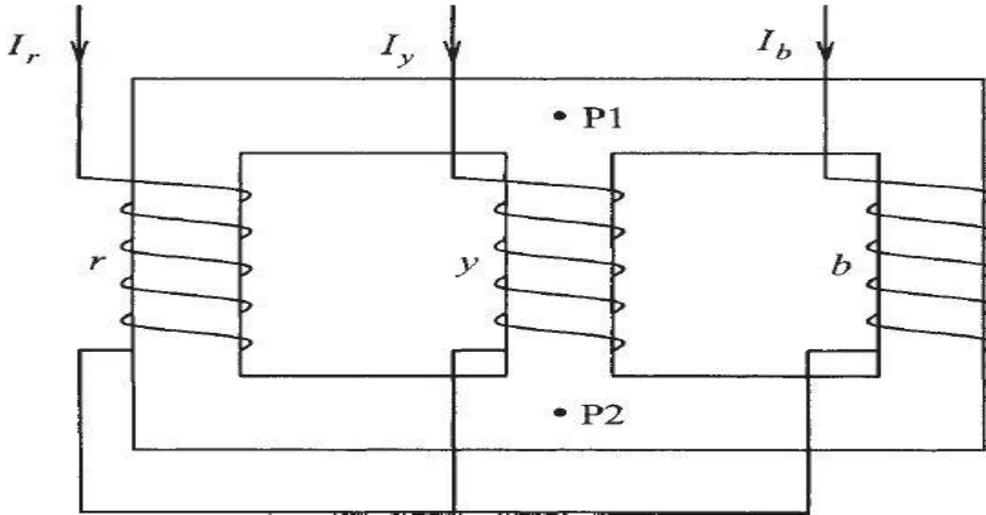
$$\lambda_m = \frac{L_{m1} \left(\frac{\lambda_1}{L_{l1}} + \frac{\lambda_2'}{L'_{l2}} \right)}{\left(1 + \frac{L_{m1}}{L_{l1}} + \frac{L_{m1}}{L'_{l2}} \right)} \quad (3.24)$$

Alternatif:

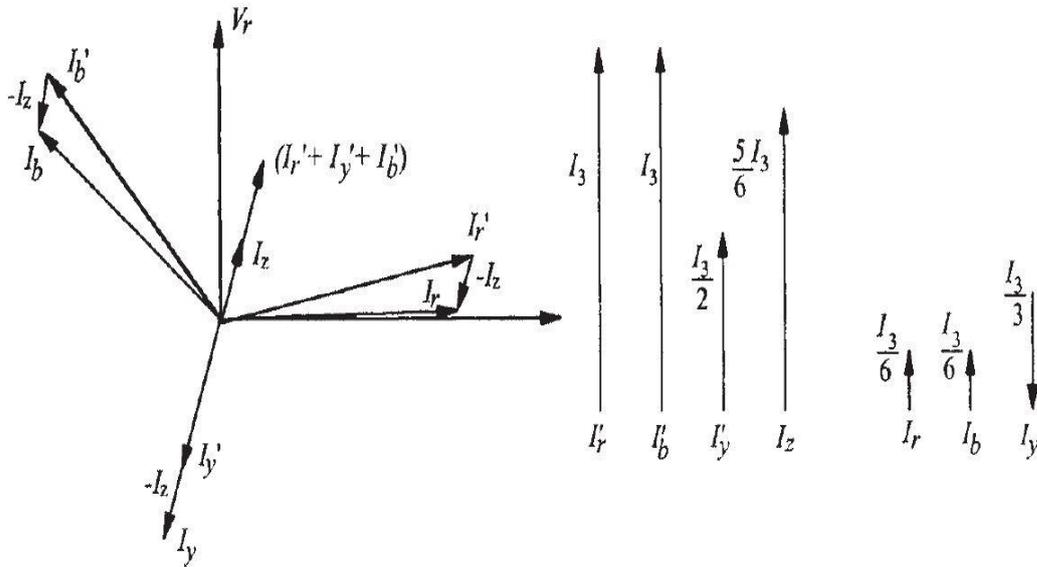
$$\lambda_m = L_{m1} \left(\frac{\lambda_1}{L_{l1}} + \frac{\lambda_2}{L'_{l2}} \right) \quad (3.25)$$

$$L_a = \left(\frac{1}{L_{m1}} + \frac{1}{L_{l1}} + \frac{1}{L'_{l2}} \right)^{-1} \quad (3.26)$$

3.4 Rangkaian Ekuivalen Transformator Tiga Fasa



Gambar 3.7 Transformator tiga fasa tiga kaki



Gambar 3.8 Arus magnetisasi tidak simetris

Tidak seperti 3 x Transformator satu fasa yang memiliki rangkaian magnetik yang terpisah, sebuah Transformator tiga fasa *thrE-E limb* memiliki rangkaian magnetik yang saling berkaitan. Arus eksitasi dan daya yang digambarkan oleh masing – masing belitan bukan merupakan arus dan daya aktual yang dibutuhkan oleh inti. Arus yang digambarkan oleh masing – masing belitan ditentukan oleh kombinasi kebutuhan dari keseluruhan komponen inti. Berdasarkan gambar 3.7 didapatkan persamaan:

$$NI_r - NI_y = NI_r' - NI_y' \quad (3.27)$$

$$NI_y - NI_b = NI_y' - NI_b' \quad (3.28)$$

$$NI_b - NI_r = NI_b' - NI_r' \quad (3.29)$$

Untuk belitan yang terhubung Y (terkoneksi Y tanpa netral yang ditanahkan),

$$I_b + I_r + I_y = 0 \quad (3.30)$$

Berdasarkan persamaan (3.27) hingga (3.29), maka didapatkan

$$I_r = I_r' - \left(\frac{1}{3}\right) (I_r' + I_y' + I_b') = I_r' - I_z \quad (3.31)$$

$$I_y = I_y' - \left(\frac{1}{3}\right) (I_r' + I_y' + I_b') = I_y' - I_z \quad (3.32)$$

$$I_b = I_b' - \left(\frac{1}{3}\right) (I_r' + I_y' + I_b') = I_b' - I_z \quad (3.33)$$

Dimana I_z merupakan komponen arus urutan nol dibutuhkan untuk mendapatkan *magnetomotive forces* (mmf) yang diburuhkan

$$I_z = \left(\frac{1}{3}\right) (I_r' + I_y' + I_b') \quad (3.34)$$

Magnetisasi tidak simetris lebih tinggi, maka magnitudo I_z menjadi lebih tinggi. Untuk tegangan terapan yang sinus, maka fluks juga sinus dan arus eksitasi mengandung harmonisa yang disebabkan oleh karakteristik magnetik yang tidak linear. Sehingga arus eksitasi pada tiga fasa (harmonisa dengan orde lebih dari 3 diabaikan) dapat diekspresikan sebagai

$$I_r = I_c \cos \omega t + I_1 \sin \omega t - I_3 \sin 3\omega t \quad (3.35)$$

$$I_y = 0.5 I_c \cos(\omega t - 120^\circ) + 0.5 I_1 \sin(\omega t - 120^\circ) - 0.5 I_3 \sin 3(\omega t - 120^\circ) \quad (3.36)$$

$$I_b = I_c \cos(\omega t - 240^\circ) + I_1 \sin(\omega t - 240^\circ) - I_3 \sin 3(\omega t - 240^\circ) \quad (3.37)$$

Dimana I_c merupakan komponen rugi – rugi inti, dan tanda negatif dikarenakan komponen harmonisa ketiga untuk mendapatkan arus eksitasi yang memiliki puncak runcing dikarenakan karakteristik magnetik tidak linear. Substitusi ke dalam persamaan (3.34),

$$I_z = 0.167I_c \cos(\omega t + 60^\circ) + 0.167I_1 \sin(\omega t + 60^\circ) - 0.833I_3 \sin 3\omega t \quad (3.38)$$

Setelah mensubstitusi I_c dan persamaan (3.35) hingga (3.37) ke dalam persamaan (3.31) hingga (3.33), arus eksitasi aktualnya digambarkan oleh

$$I_r = 0.928I_c \cos(\omega t - 9^\circ) + 0.928I_1 \sin(\omega t - 9^\circ) - 0.167I_3 \sin 3\omega t \quad (3.39)$$

$$I_y = 0.667 I_c \cos(\omega t - 120^\circ) + 0.667 I_1 \sin(\omega t - 120^\circ) - 0.333 I_3 \sin 3\omega t \quad (3.40)$$

$$I_b = 0.928I_c \cos(\omega t + 129^\circ) + 0.928I_1 \sin(\omega t + 129^\circ) - 0.167I_3 \sin 3\omega t \quad (3.41)$$

Penjumlahan dari arus harmonisa ketiga di tiga fasa harus nol (karena netralnya diisolasi) telah sesuai dengan persamaan di atas. Magnitudo I_r dan I_b hampir sebanding dan magnitudonya lebih besar daripada I_y . Arus I_y (meskipun terkecil dari ketiga arus tersebut) lebih tinggi dari arus yang dibutuhkan untuk mengeksitasi fasa tengah ($I_y > I_y'$). Sedangkan arus di *outer limbs* lebih kecil dari yang dibutuhkan untuk mengeksitasi *outer limbs* ($I_r > I_r'$ dan $I_b > I_b'$). Pada prakteknya, arus I_r dan I_b sedikit berbeda diakibatkan oleh perbedaan kecil pada karakteristik jalur magnetiknya (contohnya jarak celah udara pada sudut penggabungan yang tidak sama). Komponen harmonisa ketiga pada fasa y lebih besar daripada fasa r dan b. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8.

BAB 4

HASIL DAN ANALISIS

4.1 Karakteristik Transformator

Untuk memberikan informasi lebih detail mengenai fenomena *inrush current*, pada studi ini juga menjelaskan tentang distribusi kerapatan fluks, induktansi nonlinear dan harmonisa. Ketiga parameter dapat diketahui dengan mengolah hasil dari pengujian rangkaian terbuka dan menggunakan metode *finite-element*. Gambar 4.1 menunjukkan mesh yang dibangkitkan oleh metode FEM.

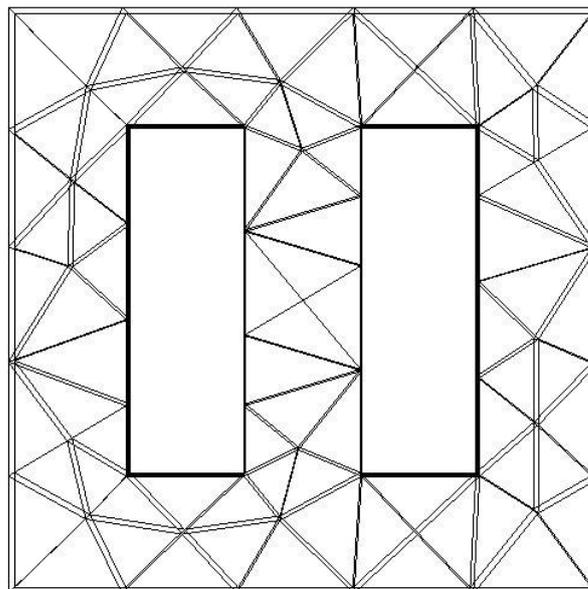
Pada studi ini, pengujian rangkaian terbuka pada Transformator tiga fasa dilakukan dengan dua cara, yaitu menginjeksikan sumber satu fasa dan menginjeksikan sumber tiga fasa. Hasil pengujian ditampilkan pada tabel 4.1 dan tabel 4.2.

Tabel 4.1 Data pengujian rangkaian terbuka Transformator satu fasa

Cara Potong E-I			Cara Potong E-E		
Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Aktif (W)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya Aktif (W)
101.6	0.188	14.5	101.6	0.975	16.5
114.3	0.213	17	114.3	1.07	19.3
127	0.255	20	127	1.18	22.1
139.7	0.318	23	139.7	1.29	25
152.4	0.41	27	152.4	1.41	29
165.1	0.523	32	165.1	1.54	33
177.8	0.69	40	177.8	1.67	36
190.5	0.84	48	190.5	1.82	40
203.2	1.06	60	203.2	2	46

Tabel 4.2 Data pengujian rangkaian terbuka Transformator tiga fasa

	Tegangan (V)			Arus (A)			Daya Aktif (W)		
	Va	Vb	Vc	Ia	Ib	Ic	Pa	Pb	Pc
Cara Potong E-I	101.6	101.6	101.6	0.19	0.137	0.188	13	9.6	13
	114.3	114.3	114.3	0.217	0.153	0.212	16	12	16
	127	127	127	0.25	0.175	0.244	20	14.6	19.8
	139.7	139.7	139.7	0.298	0.205	0.287	23.5	17.5	23.5
	152.4	152.4	152.4	0.351	0.237	0.335	27	20	26.5
	165.1	165.1	165.1	0.43	0.283	0.402	33	23	32.3
	177.8	177.8	177.8	0.53	0.34	0.49	38.5	26.1	38
	190.5	190.5	190.5	0.674	0.418	0.616	45	30	45
	203.2	203.2	203.2	0.89	0.525	0.79	50	34	50
Cara Potong E-E	101.6	101.6	101.6	0.755	0.818	0.743	8	5	8
	114.3	114.3	114.3	0.87	0.917	0.855	10	6.1	10
	127	127	127	0.99	1.03	0.98	12	7.2	12
	139.7	139.7	139.7	1.15	1.15	1.11	14.9	8.1	14.3
	152.4	152.4	152.4	1.27	1.26	1.26	17	9.9	17
	165.1	165.1	165.1	1.46	1.39	1.44	20	11	20
	177.8	177.8	177.8	1.69	1.52	1.66	25	13	24
	190.5	190.5	190.5	2.01	1.64	1.94	30	15	29
	203.2	203.2	203.2	2.44	1.8	2.44	38	18	35



Gambar 4.1 Mesh yang dibangkitkan oleh FEM

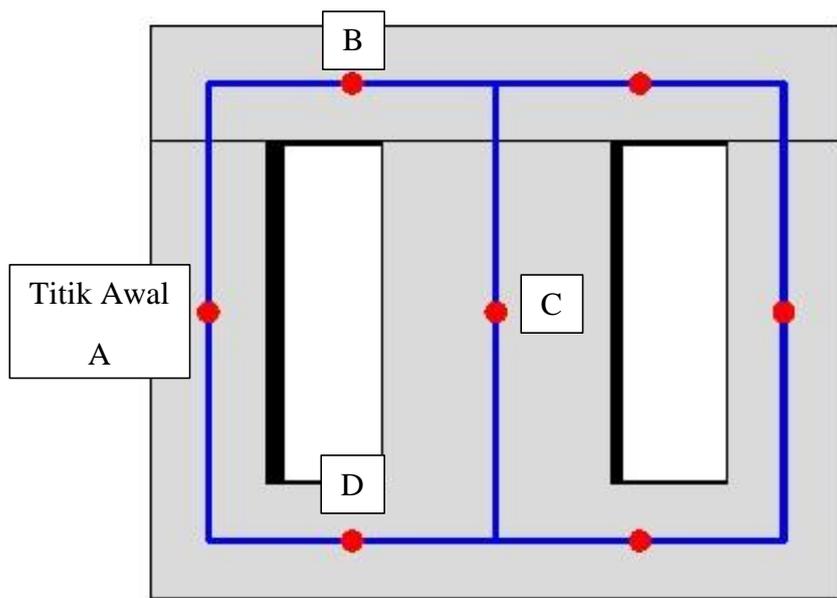
4.1.1 Distribusi Kerapatan Fluks

Pada sub bab ini dibahas tentang distribusi kerapatan fluks. Distribusi kerapatan fluks dapat memberikan informasi persebaran medan pada inti transformator. Untuk mengetahui hal tersebut digunakan lintasan bantu. Sehingga distribusi kerapatan fluks yang diamati terletak pada jalur lintasan (A-B-C-D-A). Lintasannya digambarkan pada gambar 4.2. Dikarenakan dimensi yang berbeda, maka panjang lintasan antara transformator satu fasa dan tiga fasa juga berbeda. Pada transformator satu fasa, panjang seluruh lintasan sebesar 30 cm. Sedangkan pada transformator tiga fasa, panjang seluruh lintasan sebesar 60 cm. Akan tetapi jalur nya tetap sama, yaitu A-B-C-D-A.

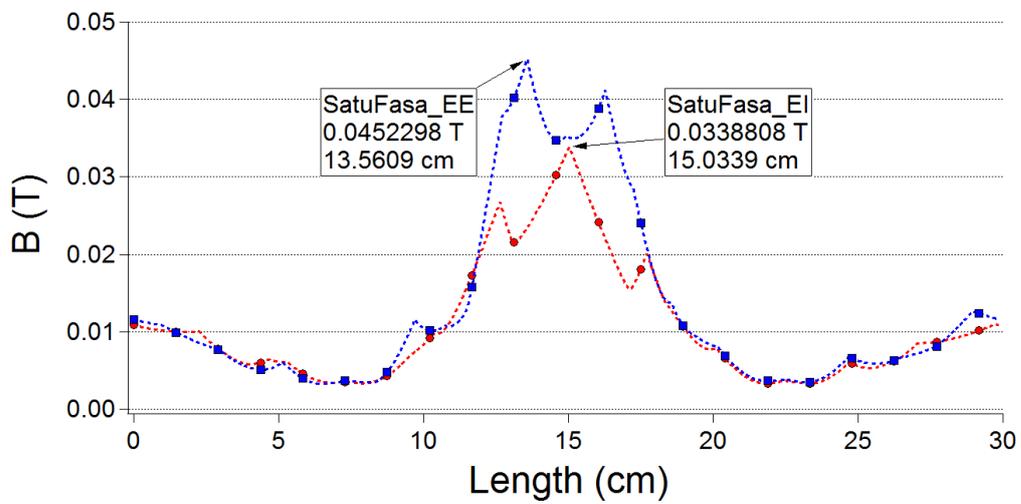
Distribusi kerapatan fluks pada Transformator satu fasa ditunjukkan oleh gambar 4.3. Nilai maksimal distribusi kerapatan fluks pada cara potong E-I sebesar 0.0338 T terletak pada 15.03 cm. Sedangkan nilai maksimalnya untuk cara potong E-E sebesar 0.0452 T terletak pada 13.56 cm.

Distribusi kerapatan fluks pada Transformator tiga fasa ditunjukkan oleh gambar 4.4. Nilai maksimal distribusi kerapatan fluks untuk cara potong E-I sebesar 0.818 T terletak pada 25.05 cm. Sedangkan nilai maksimalnya pada cara potong E-E sebesar 0.848 T terletak pada 23.70 cm.

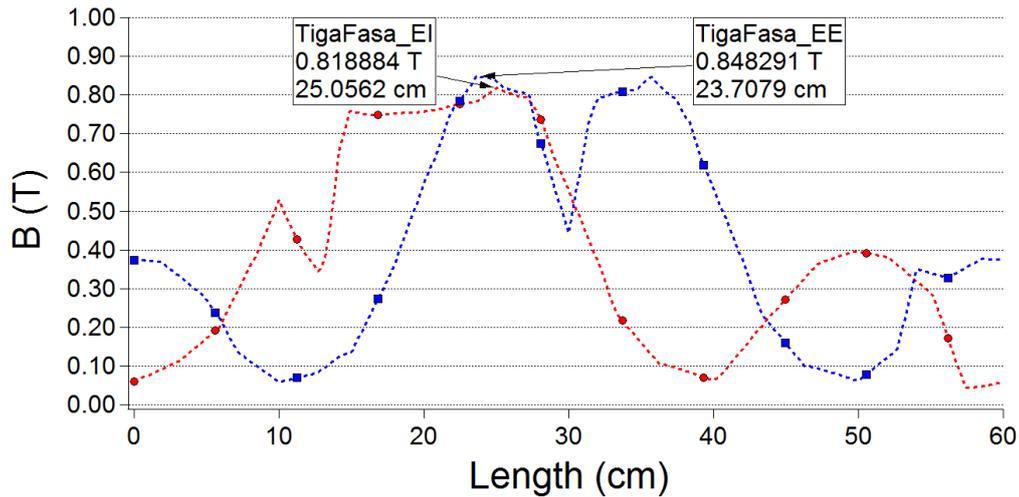
Nilai distribusi kerapatan fluks pada cara potong E-E lebih besar jika dibandingkan cara potong E-I. Hal tersebut terjadi pada Transformator satu fasa dan tiga fasa. Maka hal tersebut dapat menghasilkan besarnya *inrush current* yang lebih tinggi.



Gambar 4.2 Lintasan yang diamati (A-B-C-D-A)



Gambar 4.3 Distribusi kerapatan fluks pada Transformator satu fasa



Gambar 4.4 Distribusi kerapatan fluks pada Transformator tiga fasa

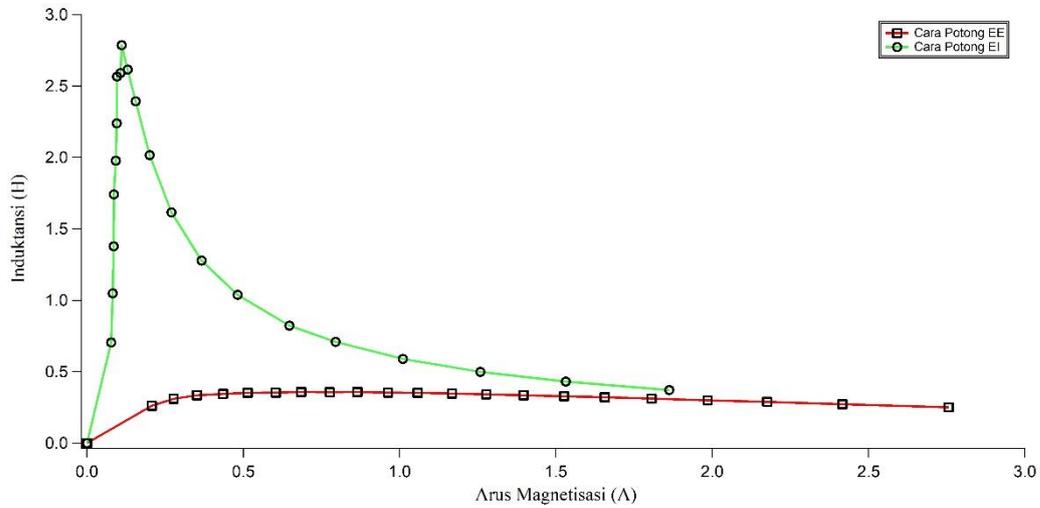
4.1.2 Induktansi Nonlinear

Nilai induktansi nonlinear didapatkan dari pengolahan data pengujian rangkaian terbuka. Gambar 4.5 menunjukkan tentang induktansi nonlinear pada Transformator satu fasa. Cara potong E-I menghasilkan nilai induktansi maksimal sebesar 2.78 H. Sedangkan nilai maksimalnya untuk cara potong E-E sebesar 0.357 H.

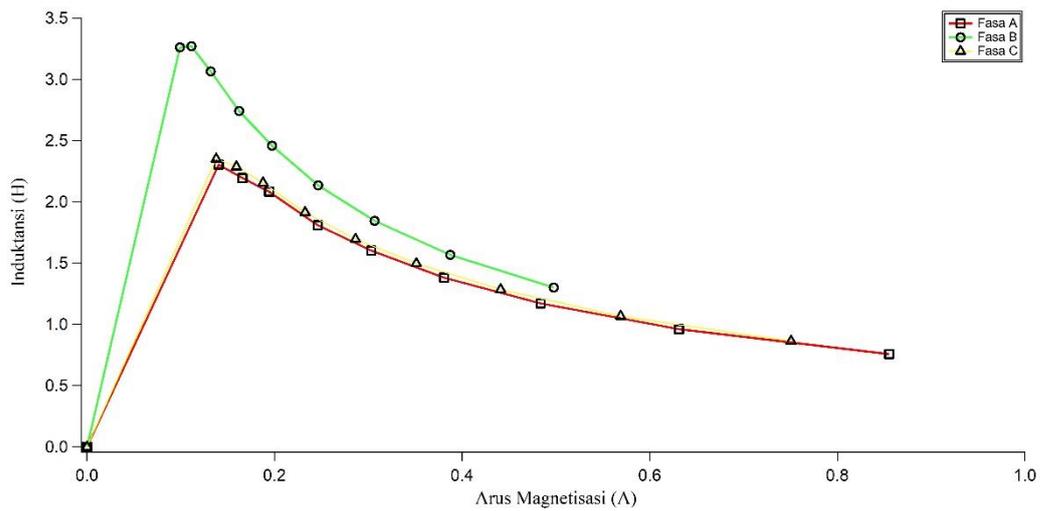
Induktansi nonlinear pada Transformator tiga fasa dengan cara potong E-I ditunjukkan oleh gambar 4.6. Dari gambar tersebut diketahui bahwa Transformator tersebut menghasilkan induktansi nonlinear yang berbeda pada masing-masing kakinya. Kedua kaki yang berada di sisi luar (biasa disebut *leg*) menghasilkan induktansi nonlinear yang mirip dan nilainya lebih kecil dari induktansi nonlinear pada kaki tengah (biasa disebut *center*). Nilai induktansi maksimal pada kedua *leg* sebesar 2.3 H. Sedangkan nilai induktansi maksimal pada *center* sebesar 3.3 H.

Induktansi nonlinear pada Transformator tiga fasa dengan cara potong E-E ditunjukkan pada gambar 4.7. Dari gambar tersebut diketahui bahwa induktansi nonlinear antara *leg* dan *center* tidak berbeda jauh. Nilai induktansi maksimal pada *leg* sebesar 0.44 H, sedangkan nilai induktansi maksimal pada *center* sebesar 0.4 H.

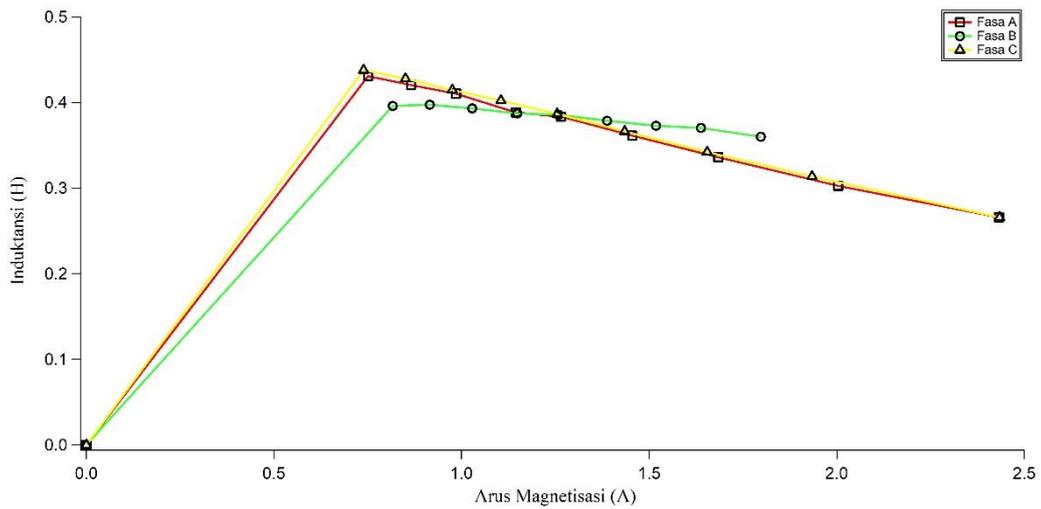
Nilai induktansi maksimal pada cara potong E-I lebih tinggi jika dibandingkan dengan cara potong E-E, hal tersebut ditunjukkan pada gambar 4.5 untuk Transformator satu fasa dan gambar 4.8 untuk Transformator tiga fasa



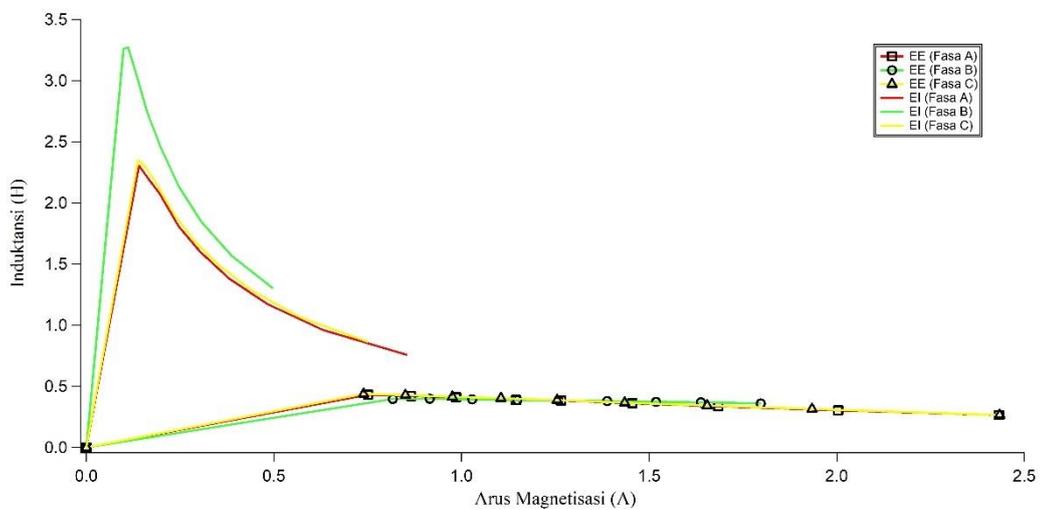
Gambar 4.5 Kurva induktansi nonlinier terhadap arus magnetisasi (satu fasa)



Gambar 4.6 Kurva induktansi nonlinier terhadap arus magnetisasi (Tiga Fasa E-I)



Gambar 4.7 Kurva induktansi nonlinear terhadap arus magnetisasi (Tiga Fasa E-E)



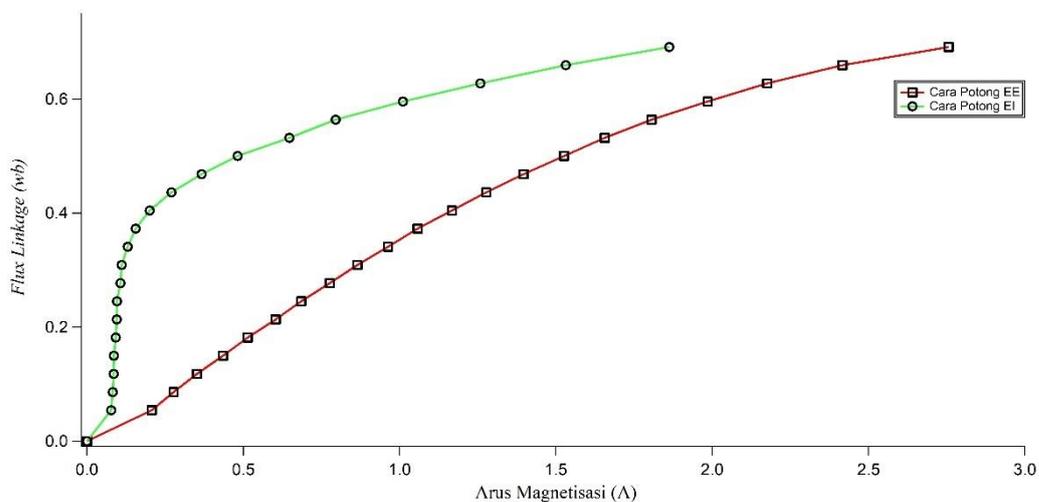
Gambar 4.8 Perbandingan induktansi nonlinear antara cara potong E-I dan E-E

Berdasarkan pengolahan data pengujian rangkaian terbuka dapat digunakan untuk mengetahui besarnya *flux linkage* pada inti. *Flux linkage* dan induktansi saling terkait. Jika arus magnetisasinya konstan, ketika nilai induktansinya besar maka nilai *flux linkage* nya kecil.

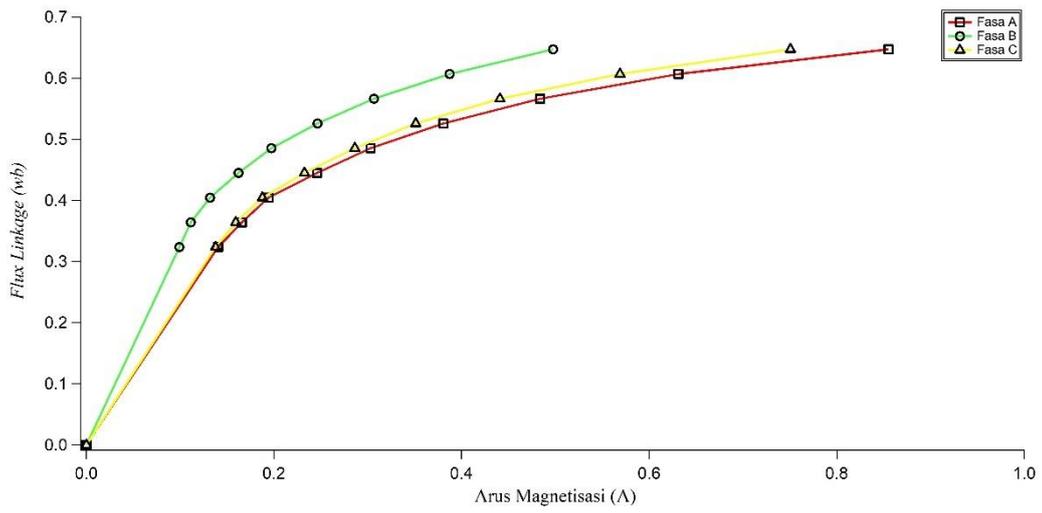
Kurva antara *flux linkage* dan arus magnetisasi dapat menunjukkan karakteristik saturasi inti pada Transformator. Pada gambar 4.9 menunjukkan karakteristik saturasi inti pada Transformator satu fasa. Dari gambar tersebut diketahui bahwa karakteristik saturasi inti pada cara potong E-I lebih curam jika

dibandingkan cara potong E-E. Sehingga ketika Transformator tersebut diberikan arus magnetisasi yang sama (contoh 0.5 A), besarnya *flux linkage* pada cara potong E-I sebesar 0.6 wb. Sedangkan pada cara potong E-E sebesar 0.18 wb.

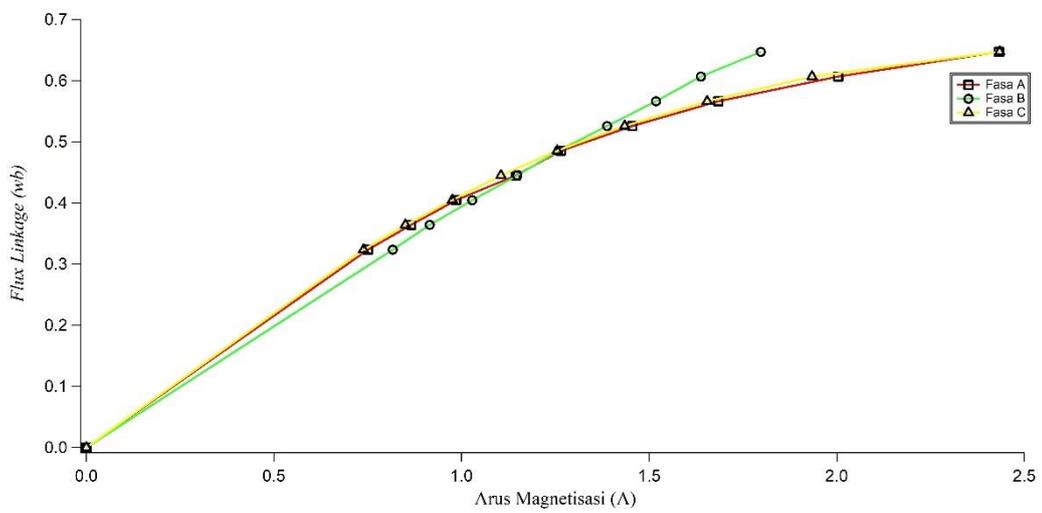
Sedangkan kurva karakteristik saturasi inti pada Transformator tiga fasa dengan cara potong E-I dan E-E ditunjukkan pada gambar 4.10 dan 4.11. Ditunjukkan bahwa pada Transformator dengan cara potong E-I, *flux linkage* terjadi perbedaan sebesar 0.1 wb antara *center* dan kedua *leg*. Sedangkan pada Transformator dengan cara potong E-E perbedaannya sebesar 0.02 wb antara *center* dan kedua *leg*. Perbandingan kurva karakteristik inti pada Transformator dengan cara potong E-I dan E-E ditunjukkan oleh gambar 4.12. Berdasarkan gambar 4.12 diketahui bahwa Transformator dengan cara potong E-I terlebih dahulu mencapai kondisi saturasi.



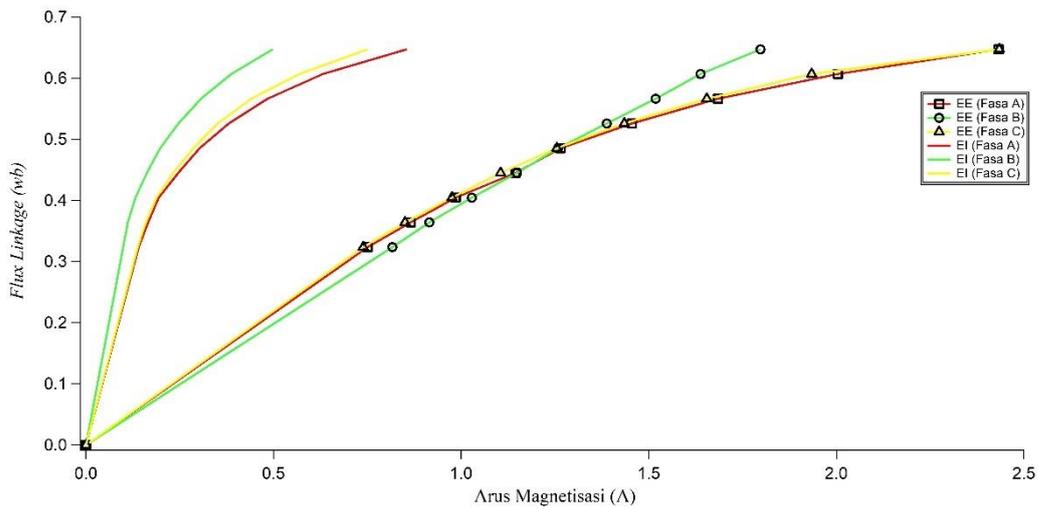
Gambar 4.9 Kurva karakteristik saturasi inti pada Transformator satu fasa



Gambar 4.10 Kurva karakteristik saturasi inti (Tiga Fasa E-I)



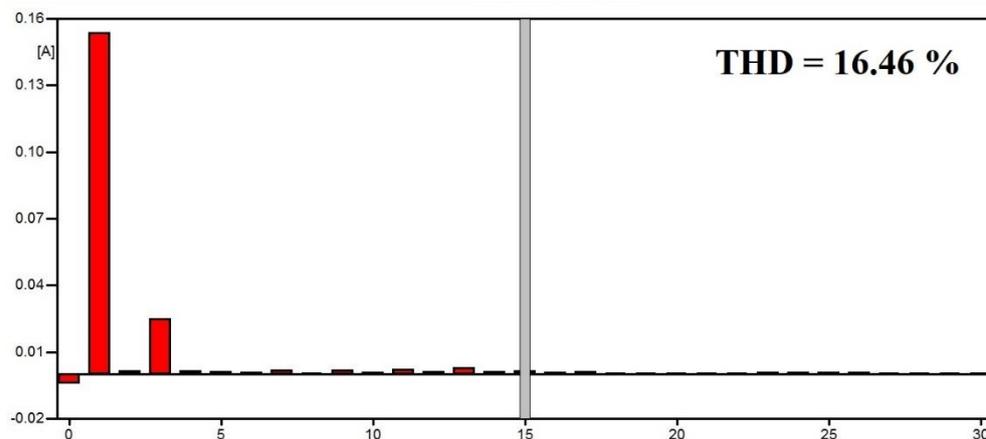
Gambar 4.11 Kurva karakteristik saturasi inti (Tiga Fasa E-E)



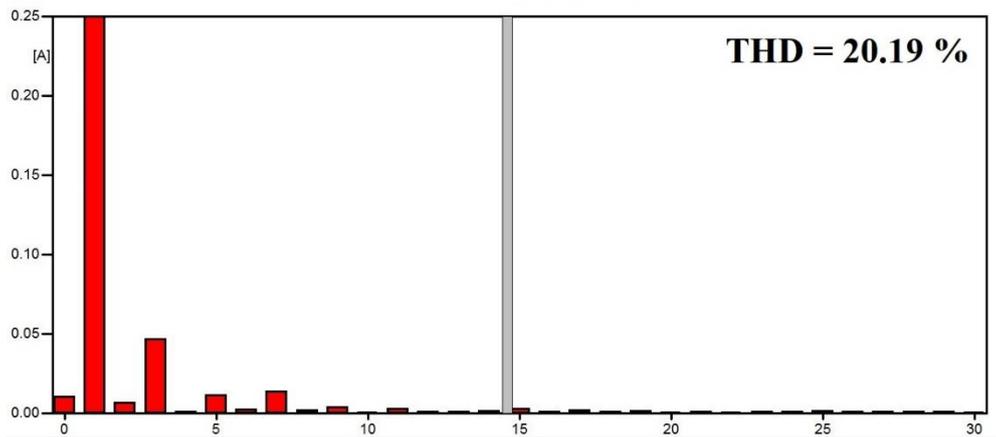
Gambar 4.12 Perbandingan kurva karakteristik saturasi inti pada Transformator tiga fasa

4.1.3 Harmonisa

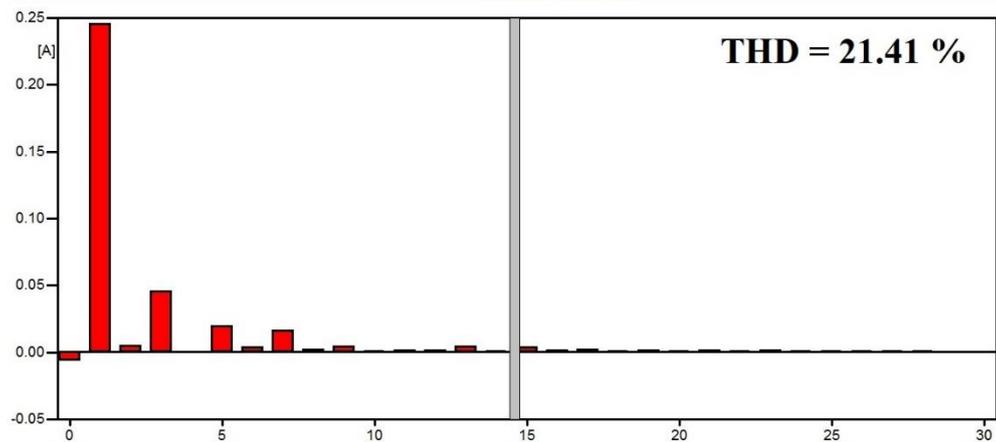
Spektrum harmonisa didapatkan dari pengolahan *inrush current* berdasarkan simulasi. Transformator dengan cara potong E-I menghasilkan THD sebesar 16.46 % (fasa A), 20.19 % (fasa B) dan 21.41 % (fasa C). Sedangkan untuk cara potong E-E menghasilkan THD sebesar 2.433 % (fasa A), 7.668 % (fasa B) dan 10.01 % (fasa C). Transformator dengan cara potong E-I menghasilkan THD yang lebih besar jika dibandingkan dengan cara potong E-E.



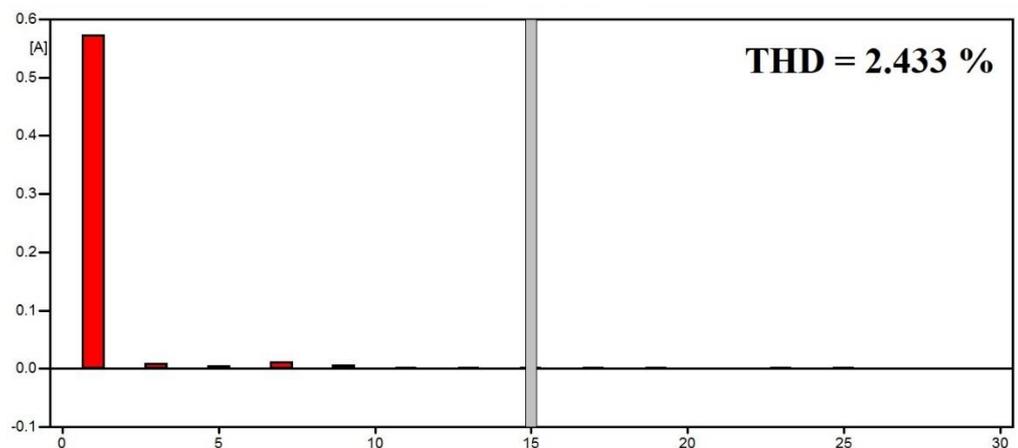
Gambar 4.13 Spektrum harmonisa fasa A pada cara potong E-I (Tiga Fasa)



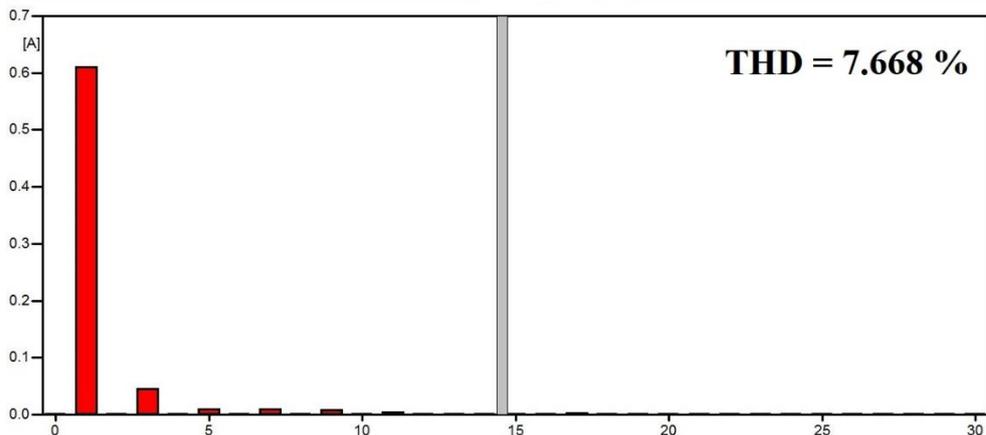
Gambar 4.14 Spektrum harmonisa fasa B pada cara potong E-I (Tiga Fasa)



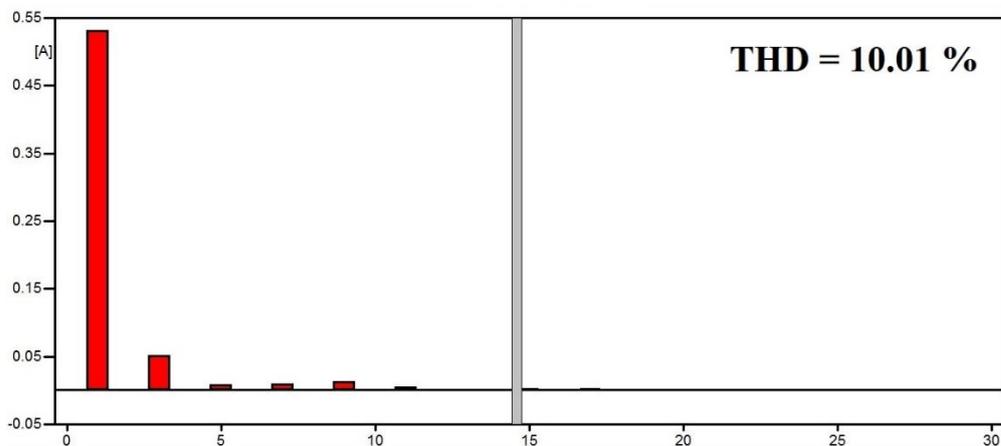
Gambar 4.15 Spektrum harmonisa fasa C pada cara potong E-I (Tiga Fasa)



Gambar 4.16 Spektrum harmonisa fasa A pada cara potong E-E (Tiga Fasa)



Gambar 4.17 Spektrum harmonisa fasa B pada cara potong E-E (Tiga Fasa)



Gambar 4.18 Spektrum harmonisa fasa C pada cara potong E-E (Tiga Fasa)

4.2 *Inrush Current*

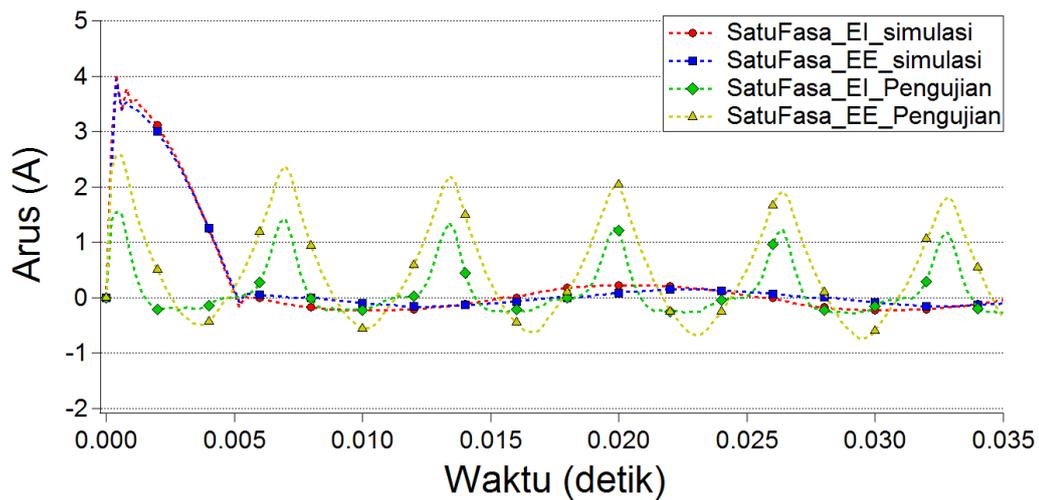
Besarnya *inrush current* pada Transformator satu fasa ditunjukkan pada gambar 4.19. Pada gambar 4.19 menunjukkan tentang besarnya *inrush current* pada Transformator dengan cara potong E-I, nilai maksimalnya sebesar 3.94 A (simulasi) dan 1.54 A (pengujian). Sedangkan transformator dengan cara potong E-E, nilai maksimalnya sebesar 4.02 A (simulasi) dan 2.57 A (pengujian).

Besarnya *inrush current* pada Transformator tiga fasa ditunjukkan pada gambar 4.20. Pada gambar 4.20 menunjukkan tentang besarnya *inrush current* pada Transformator dengan cara potong E-I, nilai maksimalnya sebesar 4.08 A

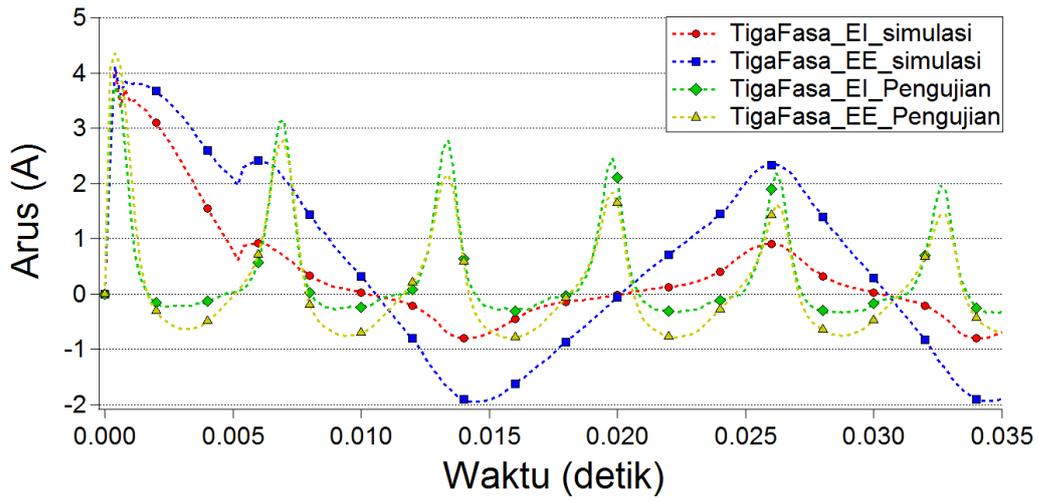
(simulasi) dan 3.73 A (pengujian). Sedangkan transformator dengan cara potong E-E, nilai maksimalnya sebesar 4.12 A (simulasi) dan 4.36 A (pengujian).

Perbandingan besarnya *inrush current* dan bentuk gelombang antara simulasi dan pengujian memiliki perbedaan. Hal tersebut dikarenakan terjadinya perbedaan perhitungan komponen *direct current* (DC) saat terjadi *inrush current*. Perhitungan komponen DC yang dilakukan oleh perangkat lunak belum mendekati besarnya komponen DC yang sesungguhnya.

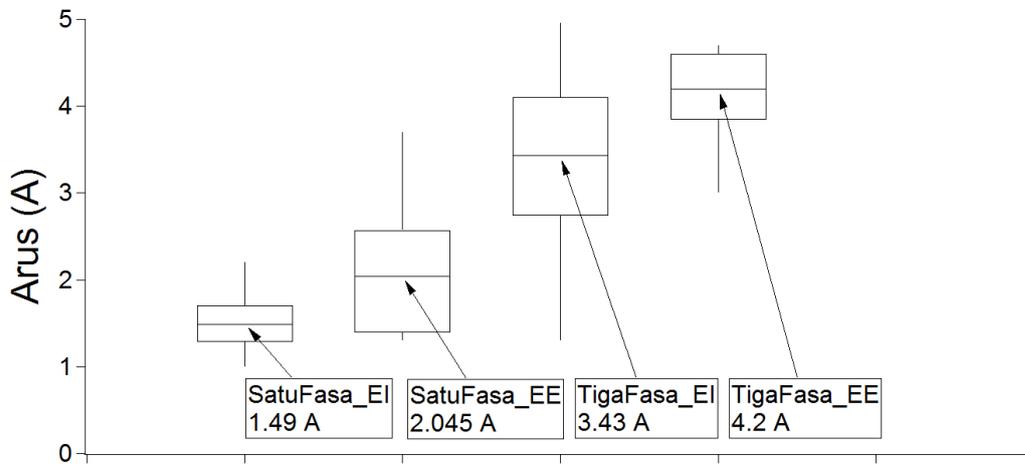
Perbandingan nilai *inrush current* berdasarkan hasil pengujian ditunjukkan pada gambar 4.21. Didapatkan bahwa nilai rata-rata *inrush current* pada Transformator satu fasa E-I sebesar 1.49 A dan Transformator satu fasa E-E sebesar 2.04 A. Sedangkan nilai rata-rata *inrush current* pada Transformator tiga fasa E-I sebesar 3.43 A dan Transformator tiga fasa E-E sebesar 4.2 A. Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian diketahui bahwa nilai *inrush current* pada Transformator dengan cara potong E-E lebih tinggi jika dibandingkan dengan cara potong E-I.



Gambar 4.19 Perbandingan *inrush current* pada transformator satu fasa



Gambar 4.20 Perbandingan *inrush current* pada transformator tiga fasa



Gambar 4.21 Perbandingan nilai *inrush current* berdasarkan hasil pengujian

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari studi tentang pengaruh cara potong inti terhadap *inrush current* pada Transformator satu fasa 1-KVA dan tiga fasa 3-KVA adalah sebagai berikut:

1. Nilai distribusi kerapatan fluks pada cara potong E-E lebih besar jika dibandingkan cara potong E-I. Hal tersebut terjadi pada Transformator satu fasa dan tiga fasa.
2. Nilai induktansi maksimal pada cara potong E-I lebih tinggi jika dibandingkan dengan cara potong E-E. Berdasarkan kurva karakteristik saturasi inti, diketahui bahwa cara potong E-I lebih cepat mencapai kondisi saturasi. Hal tersebut dikarenakan cara potong E-E memiliki sela udara yang lebih panjang
3. Transformator dengan cara potong E-I menghasilkan THD yang lebih besar jika dibandingkan dengan cara potong E-E. Hal tersebut diakibatkan titik saturasinya yang lebih rendah.
4. Nilai *inrush current* pada Transformator dengan cara potong E-E lebih tinggi jika dibandingkan dengan cara potong E-I. Berdasarkan pengujian, nilai *inrush current* pada Transformator E-I sebesar 1.5 A (satu fasa) dan 3.5 A (tiga fasa). Sedangkan pada Transformator E-E sebesar 2.2 A (satu fasa) dan 4 A (tiga fasa).
5. Semakin besar distribusi kerapatan fluks dan semakin cepat mencapai kondisi saturasi, maka semakin besar *inrush current* pada transformator.

5.2 Penelitian Selanjutnya

Perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai pengaruh cara potong inti terhadap distribusi medan magnet pada inti dan pemodelan yang lebih akurat tentang komponen *direct current* (DC) pada saat terjadi *inrush current*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- 1) E. I. Amoiralis, M. A. Tsili and A. G. Kladas, "Transformer Design and Optimization: A Literature Survey," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 24, no. 4, 2009.
- 2) Girgis, Ramsis S.; teNyenhuis, Ed G.ABB Inc., "Characteristics of Inrush Current of Present Designs of Power Transformers," *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-6, 2007.
- 3) I. M. Y. Negara, D. A. Asfani, D. Fahmi, S. Baskoro and A. B. Ksatria, "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, no. 3, 2015.
- 4) A. V. Radun, "Development of Dynamic Magnetic Circuit Models Including Iron Saturation and Losses," *IEEE Transaction On Magnetics*, vol. 50, no. 5, May 2014.
- 5) K. Dezelak, M. Petrun, M. Roser, D. Dolinar and G. Stumberger, "The Impact of Iron Core Model on Dynamic Behavior of Three-Phase Power Transformer Dynamic Model," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 51, no. 1, 2015.
- 6) Saeed Jazebi and Fransisco de Leon, "Experimentally Validated Reversible Single-Phase Multiwinding Transformer Model for the Accurate Calculation of Low-Frequency Transients," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, February 2015.
- 7) M. Persson, W. Baig, and T. Thiringer, "Measurements and Modelling of Three- and Five-Limb Transformer Behaviour during Large Voltage and Frequency Disturbances," *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, vol. 10, no. 2, pp. 334-340, 2016.
- 8) S. E. Zirka, Y. I. Moroz, H. Kr. Hoidalén, A. Lotfi, N. Chiesa and C. M. Arturi, "Practical Experience in using a Topological Model of a Core-Type

- Three-Phase Transformer-No-Load and Inrush Conditions,” DOI 10.1109/TPWRD.2016.2618900, *IEEE Transaction on Power Delivery*
- 9) P. C. Krause, O. Waszynczuk and S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
 - 10) S. Ruangsinchaiwanich and K. Khongseepai, “Investigation of Transformer Performance by the Finite Element Method,” *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) 2009*, Tokyo, 2009.
 - 11) S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering Design and Practice*, Marcell Dekker, Inc. 2004.

BIOGRAFI PENULIS



Arief Budi Ksatria, dilahirkan di Kota Jambi, 05 Agustus 1992. Riwayat pendidikannya, Sekolah Dasar (lulus 2004) di Sekolah Dasar Negeri 1 Balong, Ponorogo, lulus Sekolah Menengah Pertama tahun 2007 di Sekolah Menengah Pertama Negeri 1 Ponorogo. Tahun 2010 ia lulus dari SMA Negeri 1 Ponorogo. Kemudian ia diterima di Jurusan Teknik Elektro di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2010. Selama kuliah, penulis pernah menjadi staff departemen Lingkar Kampus periode tahun 2011-2012.

Pernah menjadi ketua II pada program kerja Electrical Sport Turnament pada periode 2011-2012.

Penulis juga menjadi Kabiro Minat dan Bakat Departemen Lingkar Kampus periode tahun 2012-2013. Selain kegiatan organisasi, penulis juga aktif menjadi asisten Laboratorium Tegangan Tinggi, Jurusan Teknik Elektro ITS mulai tahun 2013-2014..

Penulis dapat dihubungi melalui email ksatria.arief@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan